

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.015

李倩,王成军,冯涛,等.基于 SD-PLUS 耦合模型的陕西省土地利用变化及碳储量多情景预测[J].水土保持学报,2024,38(3):

LI Qian, WANG Cheng jun, FENG Tao, et al, Multi-scenario prediction of land use change and carbon storage in Shaanxi province based on SD-PLUS coupled model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

基于 SD-PLUS 耦合模型的陕西省土地利用变化及碳储量多情景预测

李倩¹, 王成军¹, 冯涛¹, 杜传甲¹, 张炳林²

(1.西安建筑科技大学管理学院,西安 710055;2.陕西省矿产地质调查中心,西安 710068)

摘要: [目的] 为探讨不同土地利用方式对区域生态系统碳储量的影响。[方法] 以陕西省为研究对象,利用 SD-PLUS 耦合模型,采用国际耦合模式比较计划第 6 阶段(CMIP6)提出的耦合共享社会经济路线和代表性浓度路线(SSP-RCP)情景,对 2030 年陕西省的土地利用变化进行预测,然后利用 InVEST 模型模拟未来不同情景下陕西省碳储量及其空间分布。[结果] (1) 对构建的 SD 模型进行历史检验,其误差 $<5\%$, PLUS 模型模拟的 2020 年土地利用 Kappa 指数为 0.86,模型精度和可靠性总体符合要求;(2) 3 种情景下,未来建设用地面积均增加,增长速率从低到高的情景分别为 SSP126、SSP245、SSP585;在所有情景下,林地面积均增加,水域面积均保持稳定;草地面积在 SSP126 情景下有小幅增加,其他情景下减少;耕地面积 3 种情景下均减少;(3) 3 种情景下,陕西省碳储量均减少,关中平原建设用地的扩张占用大量的耕地是造成陕西省碳储量下降的主要原因。[结论] 在 SSP126 情景下,建设用地扩张所占用的生态用地面积最小,碳储量损失最少,该情景同时考虑社会经济发展及生态保护的需要,可为未来陕西省国土资源保护和高质量发展提供参考模式。

关键词: 土地利用变化; SD-PLUS 耦合模型; 未来情景预测; 碳储量; InVEST 模型

中图分类号:S154.3

文献标识码:A

Multi-scenario Prediction of Land Use Change and Carbon Storage in Shaanxi Province Based on the SD-PLUS Coupled Model

LI Qian¹, WANG Chengjun¹, FENG Tao¹, DU Chuanjia¹, ZHANG Binglin²

(1. School of Management, Xi'an University of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed to explore the impact of different land use patterns on regional ecosystem carbon storage. [Methods] In this paper, using the SD-PLUS coupled model and the coupled shared socio-economic path and representative concentration path (SSP-RCP) scenario proposed by the Coupled Model Inter comparison Program Phase 6 (CMIP6), the land use changes in Shaanxi province in 2030 were projected, and then the different future scenarios simulated by the InVEST model were used to predict the Shaanxi Province's carbon storage and its spatial distribution under different future scenarios simulated by the InVEST model. [Results] (1) The SD model constructed was tested historically, and its error was less than 5% , and the Kappa index of land use in 2020 simulated by the PLUS model was 0.86, and the accuracy and reliability of the model generally met the requirements. (2) Under the three scenarios, the area of future construction land increased, and the scenarios with the lowest to highest growth rates were: SSP126, SSP245, SSP585. Under all scenarios, the area of forest land increased, and the area of watersheds remained stable; the area of grassland had a small increase under the SSP126 scenario, and decreased in other scenarios; and the area of arable land decreased in all three scenarios. (3) Carbon stock in Shaanxi Province decreased under all three scenarios, with the decrease in carbon stock in the Guanzhong plain being the main

收稿日期:2023-04-12

修回日期:2023-11-23

录用日期:2023-12-23

资助项目:国家自然科学基金项目(71872141,72072140);陕西省公益性地质调查项目(202202)。

第一作者:李倩(1998—),女,广东佛山人,硕士研究生,主要从事资源与环境管理研究。E-mail:1398115797@qq.com。

通信作者:王成军(1964—),男,吉林镇赓人,教授,博士,博士生导师,主要从事资源与环境管理研究。E-mail:xauatft@126.com。

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

reason for the decrease in carbon stock in Shaanxi province. [Conclusion] The area of ecological land occupied by the expansion of construction land is the smallest under the SSP126 scenario, which takes into account both socio-economic development and the need for ecological protection, and can provide a reference model for the future protection of land resources and high-quality development in Shaanxi province.

Keywords: land use change; SD-PLUS coupled model; future scenario prediction; carbon storage; InVEST model

Received: 2024-04-12

Revised: 2023-11-23

Accepted: 2023-12-23

近几年,全球气候变化形势十分严峻,不同国家的立场及其主张均受自身的经济和政治利益左右,从而使全球气候治理呈现错综复杂的局面,并严重威胁着人类的生命健康和生态系统可持续发展,为此,世界各国给予高度重视,并努力寻求有效的解决方案。作为世界大国,中国积极响应全球气候治理,力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,到 2060 年前实现碳中和。因此,早日实现“碳达峰、碳中和”的“双碳”目标,成为国内关注和学术研究的焦点。碳减排和碳封存是“碳中和”的 2 个决定因素^[1],碳储量增加可减少大气中二氧化碳含量,是缓解温室效应和全球变暖的最主要手段之一。人类活动让土地利用格局发生改变,并且进一步影响陆地生态系统的结构和功能,因此,增强生态系统的固碳能力,成为生态系统碳储量增加的主要方式^[2]。为此,对未来不同情景下研究区的土地利用类型的变化进行研究及对其碳储量的估算,有助于提高区域生态系统的碳汇潜力,增强陆地生态系统储碳能力,缓解减排压力,促进区域绿色协调低碳发展,对维护区域碳循环平衡稳定具有重要意义。

大量研究人员^[3-7]对不同土地利用方式下的碳储量进行研究。雒舒琪等^[3]通过结合 PLUS 模型和 InVEST 模型,创新性地模拟 2030 年西安市在规划交通和规划发展区政策驱动下的 3 种发展情景下的土地利用变化及其碳储量的空间格局,并结合政策导向探讨 3 种情景下西安市总碳储量及其空间分布的差异;巩晟萱等^[4]利用 PLUS-InVEST 模型,分析 3 种不同情景下京津冀区域碳储量的空间分布特征显示,导致碳储量下降的主要因素是建设用地对耕地的占用,而京津冀的碳储量在生态保护情景下更易于提高;曹鹏辉等^[5]结合 PLUS 模型和 InVEST 模型,预测内蒙古 2030 年 3 种情景发展下的土地利用类型和碳储量表明,生态保护情景下的碳储量最高。然而,以上研究大多采用单一的土地预测模型,其模拟精度略逊色于多个模型耦合的模拟精度。常见的土地利

用预测模型有数量预测模型、空间预测模型、耦合模型 3 种。数量模拟模型主要有 Logistic 回归模型、ANN 模型、SD 模型、灰色预测模型和 Markov 模型等,然而,此模型只能模拟土地利用在数量和面积上的变化,难以模拟其空间结构;而 CLUE-S 模型、CA 模型、ABM 模型、FLUS 模型和 PLUS 模型等空间模拟模型可对土地利用的空间布局进行模拟,但在数量模拟上却有一定的缺陷。耦合模型是为了将多个模型的优点结合起来,取长补短,从而提高单一模型模拟精度。耿思筱等^[8]基于 SD-FLUS 模型分析宁夏 2005—2020 年土地利用变化及 2035 年不同 SSP-RCP 情景下土地利用变化表明,所有情景下建设用地面积均增加,但在 SSP119 情景下,因建设用地的扩张导致生态用地面积减少的幅度最小;LI-ANG 等^[9]研究表明,相较于上述所提到的空间模拟模型,PLUS 模型具有更高的模拟精度和更接近真实景观的景观格局指标,在同一像元尺度下,PLUS 模型拥有比其他 CA 模型如 FLUS、CLUE-S、ANN-CA 和 Logistic-CA-Markov 等更高的模拟精度。因此,利用 PLUS 模型与 SD 模型组成的耦合模型,其模拟结果更可靠。

情景模拟是当前土地利用模拟领域的前沿课题,但目前大部分研究^[10-11]侧重于基于自然发展、生态保护和耕地保护 3 种不同情景下的土地利用格局分析。与之相比,国际耦合模式比较计划第 6 阶段(CMIP6)提出耦合共享社会经济路线(shared socioeconomic pathway, SSP)和代表性浓度路线(representative concentration pathway, RCP)情景^[12]。在该耦合情景下预测的土地利用时空变化,也许将成为未来土地利用领域的重点研究之一。目前,已有研究^[10-12]主要关注如全球、全国等大尺度的土地利用变化,因此,在该情景下更多需要关注如省、市等中小尺度的土地利用时空变化。

以陕西省为例,基于 2008—2020 年土地利用数据,结合研究区社会经济状况和气候条件,构建并检

验 SD-PLUS 耦合模型。然后,对陕西省在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下的土地利用变化进行模拟预测。最后,通过 InVEST 模型估算和分析 2008—2020 年及 3 种情景下 2030 年生态系统碳储量的总值和空间分布情况。将为提升陕西省碳汇功能和推动区域土地利用的低碳可持续发展提供科学依据,为探讨土地利用变化下的碳储量提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

陕西省($31^{\circ}42' - 39^{\circ}35'N$, $105^{\circ}29' - 111^{\circ}5'E$)位于中国西北内陆腹地,黄河中游,东与山西、河南相邻,西连宁夏、甘肃,南抵四川、重庆、湖北,北部为内蒙古自治区,区域内土地面积为 $20.56 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占中国国土总面积的 2.14%。陕西省地形长、地理位置特殊,从北到南可分为 3 大自然区,即陕北黄土高原、关中平原和陕南秦巴山地。陕北具有丰富的能源资源,具有显著的能源产业地位和较快的发展速度;关中人口众多,交通发达,为工业发展多元的区域,具有较好的经济基础;陕南经济基础薄弱,其工业发展受限于山地地貌和生态环境,导致其产业化水平不高,社会经济效益较低^[13]。

陕西省作为我国西北地区的重要省份之一,在推进“西部大开发”“一带一路”“关中—天水经济带”等国家战略中,肩负着承接我国人口和产业转移的重要使命。随着城市化进程的加快,土地开发利用的强度逐渐增加,对生态环境造成一定程度的破坏,导致土地利用环境逐渐恶化,进而影响该地区的碳储量,从而影响该地区的可持续健康发展。

1.2 数据来源

土地利用数据采用武汉大学 CLCD 数据^[14],空间分辨率为 30 m,根据国土资源部土地使用状况分类标准(GB/T21010—2017)^[15],重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种土地利用类型。

气候环境数据中的土壤类型、年均气温和年均降水数据,均来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/aboutus.html>),空间分辨率为 1 km;DEM 高程数据来源地理空间数据云 GDEM V3.30M 分辨率数字高程数据(<http://www.gscloud.cn/home>),通过 ArcGIS 软件处理得到坡度、坡向数据,空间分辨率均为 30 m。

社会经济数据中的人口数据和经济数据,均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。距水域、距道路的距离和政府驻地

数据来源于全国地理信息资源目录服务系统的 1:100 万公众版基础地理信息数据(<https://www.webmap.cn/main.do>),空间分辨率均为 1 km,其中,距水域和道路的距离利用 ArcGIS 软件中的欧式距离计算所得。

未来气候数据采用 IPCC 的 CMIP6(<https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>)。国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(<http://lo-ess.geodata.cn/>)具体发布 CMIP6 下 2021—2100 年中国 1 km 分辨率多情景多模式的逐月降水量、逐月平均气温数据。通过降尺度的方法生成中国 1 km 分辨率的栅格数据,再经剪裁、统计计算陕西省 2021—2030 年的年均气温和年均降水量。

栅格数据均通过 ArcGIS 软件进行处理,进行统一坐标系(CGCS2000_3_Degree_GK_CM_108E)后,通过重采样和裁剪等栅格处理,所有栅格数据的精度统一为 300 m 分辨率,同时,确保土地利用数据的行列数一致,所有栅格数据的投影坐标完全相同。

1.3 研究方法

1.3.1 系统动力学 (1)SD 模型

系统动力学是以信息反馈系统为基础来认识和解决系统问题。因此,系统行为模式和特性,主要取决于其内部的动态结构和反馈机制。一般情况下,根据实际的应用需求,通过系统结构框图、因果关系图以及存量流量图来构建特定模型进行预测^[2]。

基于 CMIP6 的 SSP-RCP 情景,考虑研究区的社会经济状况和气候条件,构建研究区土地利用系统动力学模型。模型包括经济、人口、气候及土地利用等 4 个子系统。其中,土地利用子系统由耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地构成。梳理各个子系统间相互反馈关系的基础上,运用 Vensim 软件,建立陕西省土地利用的因果图(图 1)。将为陕西省土地利用演变过程的模拟与分析奠定基础,同时,也为深入了解其演变规律及特征提供重要支撑。

根据各类驱动因素分析各子系统与各变量间的相互作用关系,经过多次的仿真试验,得到各变量间的状态方程和参数,利用 Vensim 软件建立 SD 模型(图 2)。根据陕西省的数据可获性,将 2008—2020 年作为仿真阶段,根据历史数据确定模型的参数,对模型结构进行调整和精度检验;2021—2030 年为预测阶段,根据情景需求调整关键参数,预测未来各类土地的面积数量。该模型的总模拟时间范围为 2008—2030 年,时间步长为 1 年。

表 1 土地利用 SD 模型验证

Table 1 Validation of land use SD model

检验	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
实际值(2020 年)/km ²	50 386.76	93 602.53	55 545.69	692.96	5 320.54	176.27
预测值(2020 年)/km ²	50 010.40	92 742.40	56 012.00	675.42	5 530.85	175.95
相对误差/%	0.75	0.92	0.84	2.53	3.95	0.18

(3)SSP-RCP 耦合情景

CMIP6 气候情景数据的设计结合社会经济和全球气候变化的反馈,耦合不同场景下的共享社会经济路线和代表性浓度路线,强调不同社会经济发展模式对气候变化的影响^[16]。

SSP126(SSP1 与 RCP 2.6 相结合的情景)表示社会经济可持续发展与低辐射强迫情景,2100 年辐射强迫稳定约为 2.6 W/m²。与工业化革命前多模式集合平均的全球平均气温相比,此情景下的全球平均温度将明显<2℃。SSP126 情景考虑未来世界范围内森林覆盖率的增长及随之而来的大规模土地利用变化,该情景的特点是低脆弱性和低减缓挑战。

SSP245(SSP2 与 RCP4.5 相结合的情景)表示社会经济发展的中间情景与中辐射强迫情景,2100 年辐射强迫稳定约为 4.5 W/m²。在 CMIP6 中,SSP245 情景经常被用作参考,协同区域气候降尺度计划中的区域降尺度和年代际气候预测计划。另外,由于该情景土地利用和气溶胶路径并不极端,代表世界遵循社会经济和社会的中间道路和技术发展,温室气体排放水平适中。

SSP585(SSP5 与 RCP8.5 相结合的情景)表示,截止 2100 年,随着化石能源的大量利用促使经济发展及高辐射强迫,其排放量将达到 8.5 W/m²。特点是资源密集型的快速开发和物质密集型的消费模式,化石燃料用量高,温室气体排放量大。采用 SSP—RCP 情景下预测的人口、经济、气候数据,利用 Origin 软件,将 2021—2030 年各变量的预测数据导入后,对其进行线性拟合,获得各个变量与时间的拟合方程式,从而确定各个指标的变化率。具体参数设置详见表 2。

表 2 情景模拟参数设置

Table 2 Scenario simulation parameter settings

类型	情景变量	SSP126	SSP245	SSP585
人口	人口增长率/%	0.340 0	0.520 0	0.430 0
	GDP 增长率/%	6.300 0	4.800 0	7.700 0
经济	年均增加城镇化率/%	0.010 0	0.020 0	0.030 0
	年均降雨量变化量/(mm/年)	4.342 5	0.679 2	1.342 8
气候	年均气温变化量/(℃/年)	0.010 3	0.018 4	0.064 5

1.3.2 PLUS 模型 PLUS 模型是基于栅格数据的元胞自动机(CA)模型,用于斑块规模的土地利用/土

地覆盖变化模拟,用于挖掘土地扩张的驱动因素并预测土地利用景观的斑块级演变^[9]。

该模型涉及 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用栅格数据。首先,根据 2000 年和 2010 年的土地利用数据模拟出 2020 年陕西省的土地利用。然后,用该模拟值与真实值进行比较,以 Kappa 系数为精度依据,得到 Kappa 系数为 0.86,表明在 300 m 分辨率下 PLUS 模型模拟陕西省土地利用类型效果较好。最后,根据 2010 年和 2020 年的土地利用数据预测出 2030 年的土地利用空间分布格局。

1.3.3 InVEST 模型 InVEST 模型的 Carbon 模块将陆地生态系统中的碳储量分为地上植被碳储量(地面以上所有活性植被存储的碳)、地下植被碳储量(所有活性植被地面以下的根系存储的碳)、土壤碳储量(土壤中有有机质存储的碳)、死亡有机碳储量(无生命特征的植被残骸存储的碳)4 个部分。通过将 4 个碳库的碳密度与相应土地利用类型面积相乘并求和得到总碳储量。计算公式为:

$$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead} \quad (1)$$

$$C_{all} = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i \quad (2)$$

式中: C_i 为第 i 类土地利用的碳密度总量(t/hm²); $C_{i-above}$ 为第 i 类土地利用的地上植被碳密度(t/hm²); $C_{i-below}$ 为第 i 类土地利用的地下植被碳密度(t/hm²); C_{i-soil} 为第 i 类土地利用的土壤碳密度(t/hm²); C_{all} 表示总碳储量(t); A_i 为第 i 类土地利用的面积。

碳密度数据原则上优先采用陕西省实测数据,但由于缺乏实地考察数据,因此,根据徐丽等^[17]、李克让等^[18]、解宪丽等^[19]、陈立军等^[20]研究和 2010 年中国陆地生态系统碳密度数据集,获取全国范围内的碳密度实测数据,在此基础上,对全国碳密度进行修正。降水和碳密度关系参考 ALAM^[21] 的公式,气温和碳密度的关系参考陈光水等^[22]、GIARDINA 等^[23] 的公式。仅考虑降水因素对土壤碳密度的影响,其原因是土壤碳密度与温度的关系不显著。综合修正公式为:

$$C_{SP} = 3.398\ 6 \times MAP + 3\ 996.1 (R^2 = 0.11) \quad (3)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.005\ 4 \times MAP} (R^2 = 0.70) \quad (4)$$

$$C_{BT}=28\times MAT+398(R^2=0.47,p<0.01)$$

(5)

式中： C_{sp} 是通过平均降水得到的土壤碳密度 (t/hm^2)； C_{BP} 、 C_{BT} 是分别根据平均降水和平均气温得到的植被碳密度 (t/hm^2)；MAP 和 MAT 分别是平均降水量 (mm) 和平均气温 ($^{\circ}C$)。将陕西省、全国的多年平均温度值分别确定为 11.4、7.56 $^{\circ}C$ ，平均降水量分别确定为 649、673.9 mm，代入上述公式，二者之比即为陕西省碳密度修正系数。

$$K_{BP}=\frac{C_{BP-1}}{C_{BP-2}};K_{BT}=\frac{C_{BT-1}}{C_{BT-2}}$$

(6)

$$K_B=K_{BP}\times K_{BT}=\frac{C_{BP-1}}{C_{BP-2}}\times\frac{C_{BT-1}}{C_{BT-2}}$$

(7)

表 3 陕西省碳密度数据

Table 3 Carbon density data in Shaanxi province

	t/hm ²					
土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
地上生物量碳密度 C_{above}	52.68	48.03	39.99	3.4	2.83	1.47
地下生物量碳密度 C_{below}	91.42	131.29	97.99	0	0	0
土壤碳密度 C_{soil}	122.80	116.34	113.17	0	88.36	35.57
死亡有机物碳密度 C_{dead}	0.70	2.00	0.50	0	0	0

2 结果与分析

2.1 不同情景下土地利用数量预测结果

由表 4 和图 3 可知，截止 2030 年，SSP126、SSP245、SSP585 情景下各类用地变化规律各不相同。其中，林地和建设用地面积增加，耕地和未利用地面积减少，草地则先增后减，水域在 SSP245 情景下持续减少，在 SSP126 和 SSP585 情景下先减后增。各情景下，由于人口、城镇化率和国内生产总值均增长，建设用地面积显著增长。其中，在 SSP585 情景下，建设用地增速最快，增幅最大，增加面积是 2020 年的 1.3 倍，SSP245 情景次之，SSP126 情景下其面积增加最少。林地面积在未来不同情景下均增加，其中，在 SSP126 情景下增幅最大，SSP585 情景下增幅最小，估计与陕西省为治沙抑尘、改善生态，加强荒漠化综合治理，自 1978 年起，启动实施三北防护林工程有关。3 种情景下，草地面积在 2027 年前后为先增后减，其中，只有 SSP126 情景下草地面积有所增加，增加 10.9 km^2 ，另外 2 种情景下草地面积减少程度均不相同，面积减少最明显是在 SSP585 情景下，减少 276.01 km^2 。水域面积在 3 种情景下的变化幅度均较小，其面积在 SSP126 情景下最大且有小幅度的增加，在 SSP245 情景下，面积最小且有小幅度减少，在 SSP585 情景下，基本保持不变。未利用地作为备用土地，其面积的变化是由其他土地利用类型的变化所致的。

$$K_s=\frac{C_{SP-1}}{C_{SP-2}}$$

(8)

式中： K_{BP} 、 K_{BT} 分别为通过降水因子和气温因子得到的植被碳密度修正系数，两者相乘得到植被碳密度修正系数 K_B ； C_{BP-1}/C_{BP-2} 和 C_{BT-1}/C_{BT-2} 分别是根据平均降水量和平均气温得到的全国和陕西省的植被碳密度 (t/hm^2)； K_s 为土壤碳密度修正系数， C_{SP-1}/C_{SP-2} 分别为全国和陕西省土壤碳密度 (t/hm^2)。将碳密度修正系数与全国碳密度数值相乘即为陕西省碳密度数据。死亡有机物碳密度相比其他碳密度较难获取，因此，死亡有机物碳密度优先选取与陕西省气候类型相似或与陕西省邻近地区的数据^[24]，最后得到陕西省碳密度数据(表 3)。

表 4 陕西省 3 种发展情景下各地类预测结果

Table 4 Shaanxi Province under three development scenarios by category forecast results

类型	2020 年	SD 模型(2030 年)		
		km ²		
		ssp126 情景	ssp245 情景	ssp585 情景
耕地	50 005.20	45 074.81	45 380.92	45 673.29
林地	92 686.40	97 226.50	97 073.90	96 621.10
草地	55 974.20	55 985.11	55 808.00	55 698.19
水域	675.42	684.58	656.06	674.05
建设用地	5 530.85	6 642.27	6 725.76	7 012.87
未利用地	274.88	111.48	80.11	45.25

2.2 不同情景下土地利用空间预测结果

根据 SD—PLUS 耦合模型预测结果(图 4)可知，3 种情景下的土地利用分布具有相似之处。耕地、林地、草地是陕西省的主要土地利用类型。其中，林地和草地分布最为广阔，林地主要分布在陕北南部的延安市大部分地区、关中平原南部和陕南的汉中、安康及商洛一带。草地主要分布在陕北中部和北部，即榆林市和延安市的北边。建设用地则主要集中在陕西省中部和南部的主要城市，如关中平原的西安市、宝鸡市、咸阳市、渭南市和铜川市及汉中市中部、安康市中部、商洛市东北部。此地区得益于便捷的交通和发达的通讯网络，进而带动当地的经济发展，大量建设用地集聚于此。另外，与 2020 相比，基础设施的建设还大大增强区域的物理连接性，因此，从长远来看，未来建设用地以基础设施为中心向四周扩张。陕西省的耕地大部分分布在建设用地外围、地势相对平坦的区域，同

时,延安市的中部也分布着大量的耕地。陕西省未利

用地和水域面积相对较小,因此,其空间分布不明显。

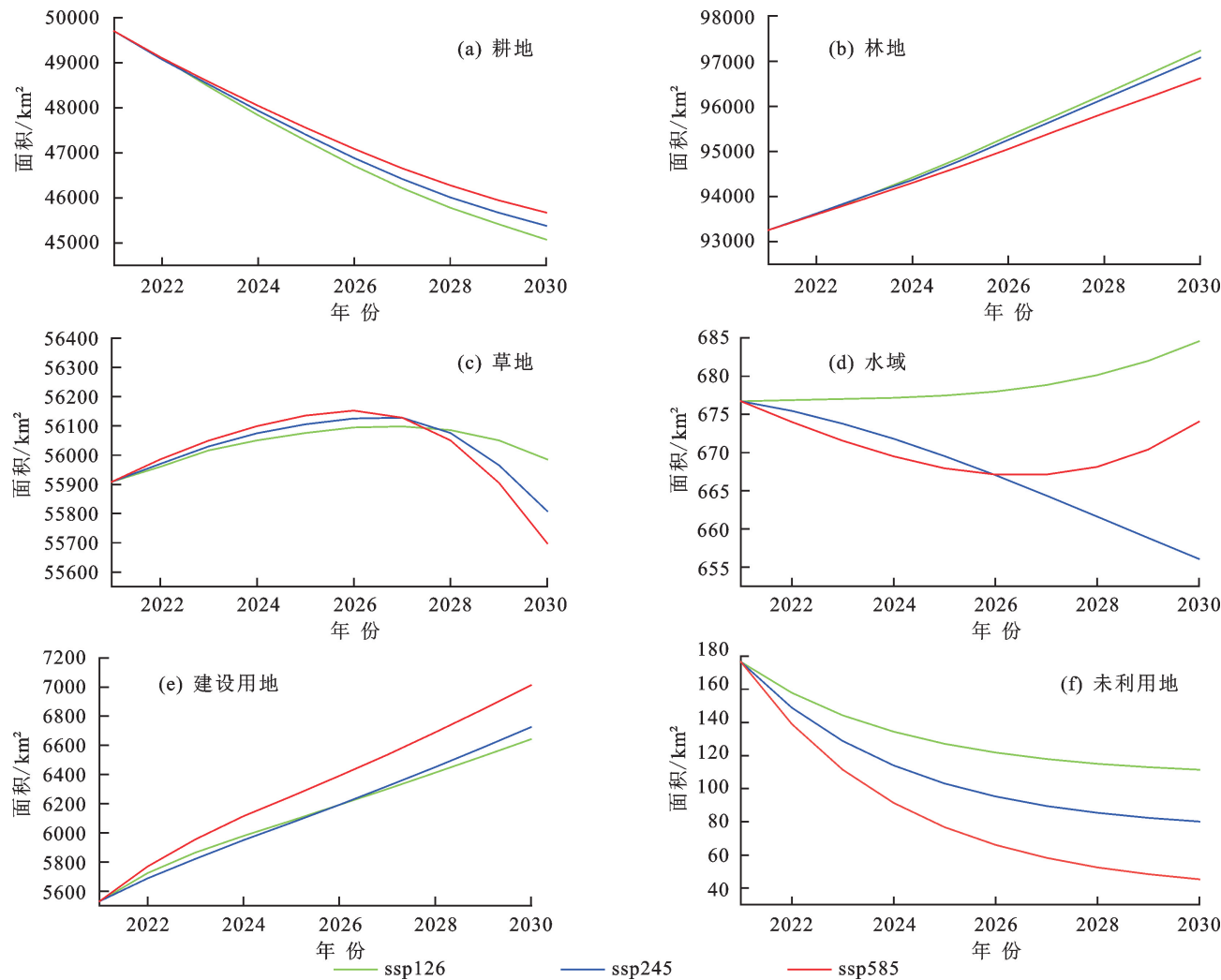


图 3 不同发展模式下陕西省各类土地需求预测

Fig. 3 Land demand forecasting of Shaanxi province in different situation

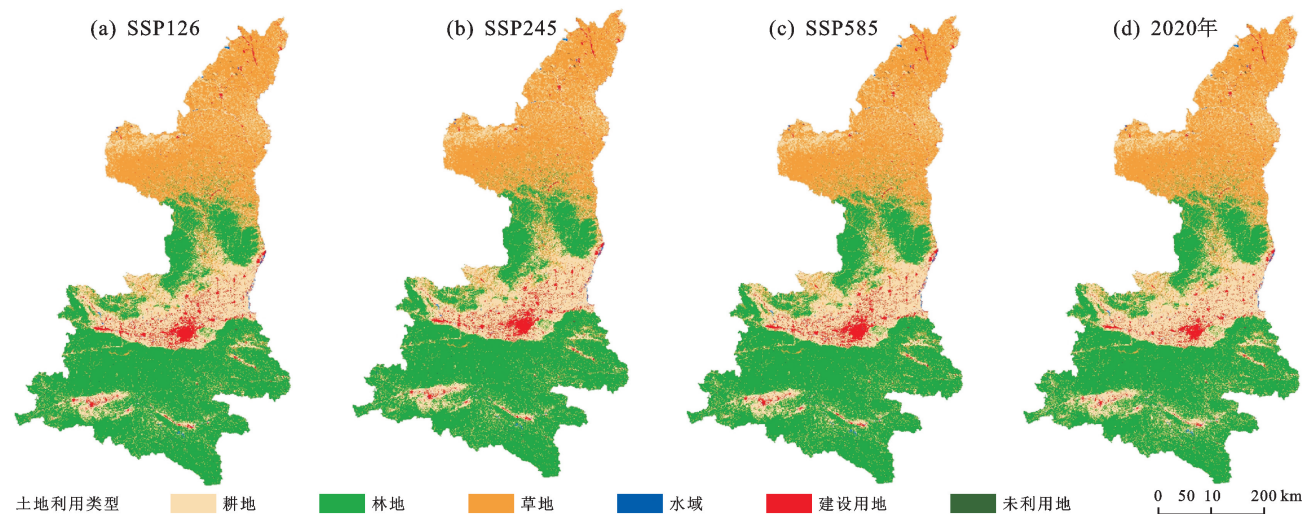


图 4 2030 年各情景下土地利用空间分布格局

Fig. 4 Patterns of spatial distribution of land use under various scenarios in 2030

尽管 3 种情景下的土地利用分布有相似之处,但在时空分布和数量上也存在差异。在 SSP126 发展情景下,预计 2030 年建设用地面积将持续增加,在 3 种情景中占比最少,占研究区域总面积 3.23%(表 5)。SSP126 情景强调可持续发展,在生态文明建设政策的推动下,林地和草地面积呈上升趋势,到 2030 年

分别将增加 4 540.2 和 10.91 km²(表 6),面积占比在 3 种情景下最多,分别为 47.26%和 27.23%(表 5)。耕地通常分布在地势平坦的区域,此地区开发成本相对较低,往往更容易被优先开发。因此,到 2030 年耕地预计减少 4 930.39 km²,较 2020 年减少 9.86%。

表 5 陕西省 2030 年多情景的土地利用统计结果

Table 5 Results of land use statistics for Shaanxi province for the 2030 multi-scenario				%
类型	基准年 (2020 年)	ssp126 情景	ssp245 情景	ssp585 情景
耕地	24.31	21.91	22.06	22.20
林地	45.05	47.26	47.19	46.97
草地	27.21	27.23	27.13	27.07
水域	0.33	0.33	0.32	0.33
建设用地	2.69	3.23	3.27	3.41
未利用地	0.13	0.05	0.04	0.02

SSP245 是社会经济和社会的中间道路和技术发展,温室气体排放中等水平,该方案中的建设用地面积预计约占陕西省总面积的 3.27%(表 5),与同期的

SSP126 的发展情景相比,该情景下建设用地扩张规模将高出近 2.0%(表 6)。关中平原的西安、宝鸡、咸阳、渭南和铜川等地区地势相对平坦、基础设施完善,城市建设用地将在原有的基础上向四周蔓延,扩张将不可避免地侵占大量耕地(图 4)。因此,到 2030 年,耕地减少 9.25%(表 6)。

SSP585 是以化石燃料为主的高速发展路径强迫下的情景,其基本特点为通过牺牲大量的自然资源从而实现经济快速发展。在此情景下,经济贸易快速增长,人口规模不断扩大,国际环境竞争与日俱增,影响将直接反映到研究区域的土地利用系统,导致建设用地面积显著增长,加剧人地矛盾。预计到 2030 年,城市建设用地面积将占研究区域总面积的 3.41%(表 5),建设用地面积增加 26.80%。同时,陕西省耕地、草地和未利用地被不断侵占,预计到 2030 年,耕地较 2020 年将减少 4 331.91 km²,减少幅度达到 8.66%;将有超过 80%,逾 229.62 km² 的未利用地损失;草地面积损失较小,较 2020 年损失 0.49%(表 6)。

表 6 3 种情景下各类用地变化量及变化率

Table 6 Amount and rate of change of each type of site under the three scenarios						
类型	ssp126 情景		ssp245 情景		ssp585 情景	
	变化量/km ²	变化率/%	变化量/km ²	变化率/%	变化量/km ²	变化率/%
耕地	-4 930.39	-9.86	624.28	-9.25	-4 331.91	-8.66
林地	4 540.10	4.90	4 387.50	4.73	3 934.70	4.25
草地	10.91	0.02	-166.20	-0.30	-276.01	-0.49
水域	9.16	1.36	-19.36	-2.87	-1.37	-0.20
建设用地	1 111.42	20.09	1 94.91	21.60	1 482.02	26.80
未利用地	-163.40	-59.44	-194.77	-70.86	-229.62	-83.54

2.3 碳储量多情景模拟预测结果

2.3.1 不同情景下碳储量对比分析 由表 7 可知,未来陕西省碳储量在 3 种情景下均减少。SSP126 情景下,2030 年陕西省碳储总量预测达 5 564.17×10⁶ t,与 2020 年相比,总量减少 17.6×10⁶ t,年均减少 1.76×10⁶ t,碳储量减速相对较小,表明实施生态保护政策、提高区域生态保护效力,对于陕西省作用有着极其重要的作用;SSP245 情景下,2030 年陕西省碳储总量预测达 5 562.94×10⁶ t,相比于 2020 年,总量减少 18.8×10⁶ t,年均减少 1.88×10⁶ t,与 SSP126 情景相比,碳储量相差较小;SS585 情景下,2030 年陕西省碳储总量预测达 5 560.8×10⁶ t,相比于 2020 年,总量减少 20.94×10⁶ t,年均减少 2.1×10⁶ t,是碳储量减少最多的情景,表明 SSP585 情景下经济发展速度及城市建设速度较快,建设用地的扩张范围较其他 2 种情景较大。

从碳储量的空间分布及其变化来看,2021—2030 年,陕北地区的碳储量增量有小幅减少,但基本保持稳定,陕南地区碳储量有小幅增加,而以西安市

为核心的关中平原城市群碳储总量有较大幅度减少。与 2020 年相比,陕北在 3 种情景下均有小幅度减少,在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下分别减少 1.24×10⁶,1.08×10⁶,0.96×10⁶ t,陕南有小幅增加,3 种情景下分别增加 6.94×10⁶,6.66×10⁶,5.75×10⁶ t(图 5)。关中平原的碳储量有较大幅度下降,3 种情景下分别减少 20.11×10⁶,21.56×10⁶,22.78×10⁶ t,关中平原是导致陕西省碳储量下降的主要地区,其碳储量减少是导致陕西省碳储量下降的主要原因。另外,由关中平原在 SSP585 情景下碳储量降幅最大可知,关中平原城市群经济人口快速发展,建设用地的快速扩张是导致陕西省碳储量下降的主导因素。

表 7 分地区不同情景下总碳储量

Table 7 Total carbon stocks under different scenarios by region					×10 ⁶ t
	2020	SSP126	SSP245	SSP585	
陕北	2 073.22	2 071.98	2 072.14	2 072.26	
关中	1 465.55	1 445.34	1 443.99	1 442.77	
陕南	2 031.11	2 038.05	2 037.77	2 036.86	

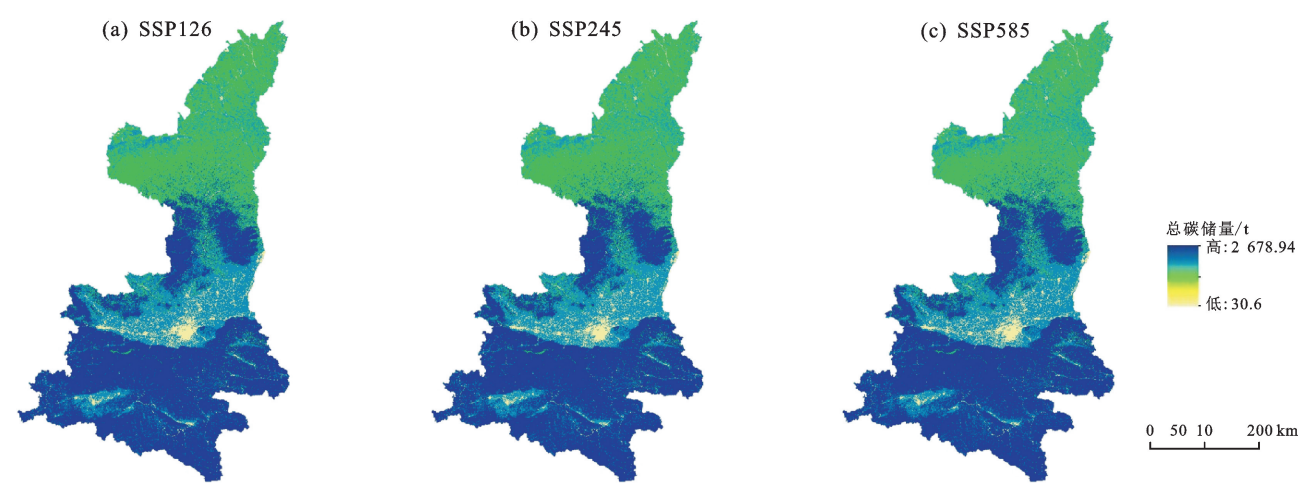


图 5 不同情景下碳储量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon stocks under different scenarios

2.3.2 地类转换间碳储量变化特征分析 受各土地类型间面积转移和碳密度差异等因素影响,各地类间的变化转化对碳储量影响程度有所差别。关中平原碳储量减少是导致陕西省碳储量下降的主要原因,陕北碳储量有较小幅度下降、陕南地区碳储量有所增加。表 8~表 10 分别是陕北、关中、陕南各土地利用类型变化对碳储量的影响,通过分析从而探究出影响碳储量的关键因素。

与 2020 年相比,陕北在 3 种不同情景下碳储量均有小幅度增长,在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下碳储量分别增加 1.21×10^6 、 1.22×10^6 、 1.59×10^6 t,其主要原因是有一部分建设用地转化成耕地、未利用地转化成耕地和草地,其碳储量增加占比相对较大。虽然有耕地转化成草地和建设用地、林地转化成耕地和建设用地,但其占比较小,因此,最终提高区域碳储总量。

表 8 陕北不同情景下各地类转换间引起的碳储量变化

Table 8 Carbon stock changes induced by switching between taxa under different scenarios in northern Shaanxi province

变化类型		面积/km ²			变化碳储量/($\times10^6$ t)			总计/($\times10^6$ t)		
转出	转入	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
耕地	林地	144.99	143.64	135.72	0.44	0.43	0.41			
	草地	494.64	328.41	224.73	-0.79	-0.52	-0.36	-0.53	-0.29	-0.15
	建设用地	9.90	11.16	11.34	-0.17	-0.20	-0.20			
林地	耕地	11.34	11.97	5.76	-0.03	-0.04	-0.02	-0.04	-0.05	-0.02
	建设用地	0.36	0.27	0	-0.01	-0.01	0			
建设用地	耕地	6.84	6.12	6.84	0.12	0.11	0.12	1.53	1.36	1.62
	耕地	1.08	0.45	0.45	0.02	0.01	0.01			
未利用地	草地	10.53	8.01	5.40	0.23	0.17	0.12	0.25	0.19	0.13
	建设用地	0.63	1.53	1.26	0	0.01	0.01			
总计/($\times10^6$ t)								1.21	1.22	1.59

关中平原的碳储量在 3 种情景下均有较大程度减少。在 SSP585 情景下碳储量减少最多,减少 26.19×10^6 t,而在另外 2 种情景下分别减少 24.14×10^6 、 22.61×10^6 t。从各土地利用间转移来看,碳储量损失主要在于耕地向建设用地的转化,其面积在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下分别向建设用地转化 $1\,530.99$ 、 $1\,434.06$ 、 $1\,652.94$ km²,导致碳储量分别减少 27.01×10^6 、 25.3×10^6 、 29.16×10^6 t,转化面积越大,碳储量减少就越多。因此,关中平原建设用地的扩张主要占用耕地,是导致关中平原乃至陕西省碳储量下降的主要因素。另外,碳储量在 SSP585 情景

下降幅最大,由此可知,以化石燃料为主的高速发展路径不利于碳储量的增加。虽有部分林地转化成耕地和建设用地导致碳储量减少,但是其占比不大,不是导致碳储量减少的主要因素。

陕南地区碳储量在 3 种情景下有较大幅度增加,在 SSP126 情景下增加最多,增加 7.79×10^6 t,在另外 2 种情景下分别增加 7.51×10^6 、 6.60×10^6 t。从各土地利用间转移来看,碳储量增加的主要原因是耕地向林地的转化面积较大,并且向建设用地转化面积较小。在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下耕地向林地转化 $3\,068.73$ 、 $2\,981.7$ 、 $2\,569.41$ km²,对应增加的

碳储量分别为 9.22×10^6 , 8.96×10^6 , 7.72×10^6 t, 耕地转化成林地的面积越大, 储存的碳储量就越多。另外, 由于 SSP126 情景下碳储量最大, 由此可知, 可持续性绿色发展路径更有利于碳储量增加。

表 9 关中不同情景下各地类转换间引起的碳储量变化

Table 9 Changes in carbon stocks between taxonomic transitions under different scenarios in Guanzhong										
变化类型		面积/km ²			变化碳储量/($\times 10^6$ t)			总计/($\times 10^6$ t)		
转出	转入	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
耕地	林地	556.56	542.61	2 569.41	1.67	1.63	1.45			
	草地	21.96	13.59	0.27	-0.04	-0.02	-0.02	-25.37	-23.69	-27.73
	建设用地	1 530.99	1 434.06	1 652.94	-27.01	-25.30	-29.16			
林地	耕地	76.41	63.72	86.40	-0.23	-0.19	-0.10	-0.30	-0.29	-0.10
	建设用地	3.60	4.77	0.09	-0.07	-0.10	-0.002			
建设用地	耕地	314.55	294.57	91.89	5.55	5.20	1.62	1.53	1.36	1.62
未利用地	耕地	0	0.18	0.09	0	0	0			
	建设用地	1.71	1.53	1.62	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
总计/($\times 10^6$ t)								-24.14	-22.61	-26.19

表 10 陕南不同情景下各地类转换间引起的碳储量变化

Table 10 Changes in carbon stocks between class transitions under different scenarios in southern Shaanxi province										
变化类型		面积/km ²			变化碳储量/($\times 10^6$ t)			总计/($\times 10^6$ t)		
转出	转入	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
耕地	林地	3 068.73	2 981.70	2 569.41	9.22	8.96	7.72			
	草地	0.18	0.18	0.27	0	0	0	7.01	6.83	5.23
	建设用地	125.55	121.05	141.21	-2.21	-2.14	-2.49			
林地	耕地	221.94	193.95	86.40	-0.67	-0.58	-0.26	-0.75	-0.68	
	建设用地	4.14	4.59	0.09	-0.09	-0.09	0			-0.26
建设用地	耕地	86.67	76.95	91.89	1.53	1.36	1.62	1.53	1.36	1.62
未利用地	建设用地	0.18	0.18	0.09	0.001	0	0	0	0	0
总计/($\times 10^6$ t)								7.79	7.51	6.60

3 讨论

耕地是农业生产的基本要素,其生产安全直接关系到整个社会环境的发展。在现行的土地管理法条例当中,反复强调耕地保护的重要性,提出要严格遵守耕地保护红线,实施耕地保护补偿制度。陕西虽不是全国的主要粮区,但也为“大国粮仓”作出不可忽视的贡献。为此,更需进一步加大耕地保护工作,做到耕地数量与生产质量齐头并进。

不同情景预测陕西省 2030 年土地利用模拟显示,与 2020 年土地利用现状相比,无论在何种情景下,耕地面积均将逐渐减少,由于耕地在陆地生态系统碳汇能力有相当重要的作用,并且面积减少是导致陕西省碳储量下降的主要原因。因此,在未来的规划中,陕西省需遵循服从区域相关部门的管控,根据当地的实际情况,对耕地进行科学、合理地保护,不以牺牲耕地为代价发展建设用地,积极推进动高标准的农业化,在保证耕地数量和质量的的同时,提高耕地的总体质量和农业综合效益,为加快我国新型现代化农业区域建设提供多视角、多层次的土地模式和生产安全保障。

《关中平原城市群建设“十四五”实施方案》^[25]明确提出,应制止关中地区都市圈的无序扩张,充分发挥西安辐射带动作用,明确主要城市功能定位,促进区域资源要素优化配置,激发中小城市发展动能,形成分工合理、功能互补、协调联动的城镇体系。

在对陕西省未来土地利用模拟情景中,在不同情景对比下,2020—2030 年,陕西省建设用地面积依旧呈一定程度的增长趋势,主要表现在以西安为核心的中心城市逐步向外扩张占用周围耕地、林地等,从而导致碳储量严重缺失。陕西省建设用地结构若不进行合理调整,随着其人口和经济的快速增长,将导致建设用地的无序扩张,同时,也带来严重的土地供需矛盾、水土流失、碳汇流失等问题,因此,需要科学、合理地划定“可建设区”、“限制建设区”、“禁建设区”,对陕西省的自然生态系统进行严格控制,确保陕西省的基本自然生态环境不被破坏,不突破建设用地的“红线”,并积极推动城乡建设用地布局,提高土地集约利用水平。

近年来,InVEST 模型被许多学者^[26-28]广泛应用于区域碳储量及其时空分布格局的评估,具有操作简

单、参数可获性好、结果相对准确、方便快捷等优点。但是,本研究所采用的碳密度并未考虑不同地类每年碳密度的实际变化,也未考虑植被种类、植被生长情况等对碳密度所产生的影响。此外,由于缺乏实地测量数据,修正的碳密度数据只能与相邻区域的研究成果进行比较。因此,在今后的研究中,可通过实地考察获得实测数据,并对碳储量进行合理的修正,从而提高估算碳储量的准确性。

4 结论

(1)从土地利用数量预测结果来看,耕地和未利用地在未来3种情景下面积均减少,林地和建设用地的面积均增加,草地面积只在SSP126情景下有少量增加,水域面积基本不变;从土地利用空间预测结果来看,未来陕西省依然以耕地、林地和草地为主。得益于关中平原较低的地势以及完善的基础设施,建设用地未来以关中平原为中心向四周蔓延,并在SSP585情景下扩张最多。

(2)未来3种情景下陕西省碳储量均下降,且在SSP585情景下减少最多。从空间分布上来说,关中平原是碳储量减少最多的区域;从地类转化上来看,关中平原碳储量减少的主要原因为大量的耕地向建设用地转化,且在SSP585情景下,关中平原的耕地向建设用地转化的面积最多,碳储量下降最大。

(3)土地利用变化导致碳储量增加或者减少。SSP585情景下,经济和人口快速发展,建设用地扩张占用大量的耕地,导致碳储量大幅减少;SSP126情景下,虽然建设用地持续扩张,但占用的生态用地相对较少,同时,考虑社会经济发展和生态保护需要,碳储量损失程度最小。因此,为实现区域内碳中和的可持续发展目标,陕西省要对城市用地进行合理规划,防止建设用地盲目扩张,坚守耕地红线,在保障其他生态用地不被严重破坏的前提下发展经济。

参考文献:

- [1] 方精云.碳中和的生态学透视[J].植物生态学报,2021,45(11):1173-1176.
FANG J Y. Ecological perspectives of carbon neutrality [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45 (11): 1173-1176.
- [2] 张燕,师学义,唐倩.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J].生态学报,2021,41(1):360-373.
ZHANG Y, SHI X Y, TANG Q. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe river under different land use scenarios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 360-373.
- [3] 雒舒琪,胡晓萌,孙媛,等.耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):300-314.
LUO S Q, HU X M, SUN Y, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled PLUS-InVEST model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 300-314.
- [4] 巩晟萱,张玉虎,李宇航.基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测[J].干旱区资源与环境,2023,37(6):20-28.
GONG S X, ZHANG Y H, LI Y H. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region-a PLUS-InVEST model approach [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(6): 20-28.
- [5] 曹鹏辉,齐晓明,杨雯,等.内蒙古土地利用多情景模拟与碳储量预测分析[J].干旱区资源与环境,2023,37(9):83-90.
CAO P H, QI X M, YANG W, et al. Multi scenario simulation and prediction of carbon storage for land use types in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(9): 83-90.
- [6] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
SUN F H, FANG F M, HONG W L, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui province based on PLUS and InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 151-158.
- [7] 李俊,杨德宏,吴锋振,等.基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J].水土保持通报,2023,43(1):378-387.
LI J, YANG D H, WU F Z, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 378-387.
- [8] 耿思筱,杨志,党小虎,等.基于 SD-FLUS 模型的宁夏土地利用多情景模拟[J].地球科学与环境学报,2023,45(4):806-818.
GENG S X, YANG Z, DANG X H, et al. Multi-scenarios simulation of Ningxia land use in China based on SD-FLUS model [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 806-818.
- [9] LIANG X, GUAN Q F, 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: e101569.
- [10] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4473-4487.
- REN Y M, LIU X P, XU X C, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4473-4487.
- [11] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟: 以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2086-2097.
- ZHANG X Y, ZHANG X, LI D H, et al. Multi-scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2086-2097.
- [12] ZHU J P, XIE A H, QIN X, et al. Assessment of future Antarctic amplification of surface temperature change under different Scenarios from CMIP6[J]. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20(4): 1074-1089.
- [13] 黄娇, 陈海, 王佳宇, 等. 区域社会-生态系统恢复力协调发展时空演变研究: 以陕西省为例[J/OL]. *干旱区地理*, 2023: 1-15 [2024-01-18] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20231011.1727.001.html>.
- HUANG J, CHEN H, WANG J Y, et al. Spatiotemporal evolution of the coordinated development of regional social-ecological system resilience: A case study of Shaanxi province [J]. *Arid Land Geography*, 2023: 1-15 [2024-01-18] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20231011.1727.001.html>.
- [14] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [15] 徐勇, 赵桑, 段健. 国土空间规划的土地利用分类方案研究[J]. *地理研究*, 2019, 38(10): 2388-2401.
- XU Y, ZHAO S, DUAN J. Studies on the land use classification scheme for territory spatial planning[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2388-2401.
- [16] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 519-525.
- ZHANG L X, CHEN X L, XIN X G. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 519-525.
- [17] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2150-2167.
- XU L, YU G R, HE N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2150-2167.
- [18] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2003, 33(1): 72-80.
- LI K R, WANG S Q, CAO M K. Vegetation and soil carbon storage in China [J]. *Science in China, Ser D*, 2003, 33(1): 72-80.
- [19] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35-43.
- [20] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. *遥感学报*, 2002, 6(2): 129-135, 164.
- CHEN L J, LIU G H, LI H G. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(2): 129-135, 164.
- [21] ALAM S A, STARR M, CLARK B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89: 67-76.
- [22] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配 (TBCA) 研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(1): 34-42.
- CHEN G S, YANG Y S, LIU L Z, et al. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(1): 34-42.
- [23] GIARDINA C P, RYAN M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. *Nature*, 2000, 404: 858-861.
- [24] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1214-1232.
- WANG T F, GONG Z W, DENG Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi province based on land use change[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1214-1232.
- [25] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委关于印发《关中平原城市群建设“十四五”实施方案》的通知: 发改规划〔2022〕979 号 [A/OL]. [2022-06-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/22/content_5702171.htm

- Central People's Government of The People's Republic of China. Circular of the national development and reform commission on the issuance of the "14th Five-Year Plan" for the construction of the Guanzhong plain city cluster: Development and Reform Planning [2022] No 979 [A/OL]. [2022-06-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/22/content_5702171.htm
- [26] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的广东省碳储量空间关联性及其预测[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4827-4839.
- LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage in Guangdong province based on InVEST-PLUS model[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4827-4839.
- [27] PIYATHILAKE I D U H, UDAYAKUMARA E P N, RANAWEERA L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva province, Sri Lanka[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 8(2): 2213-2223.
- [28] 邓喆, 丁文广, 蒲晓婷, 等. 基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 324-334, 296.
- DENG J, DING W G, PU X T, et al. Spatial-temporal distribution of carbon storage in Qilian mountain national park based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 324-334, 296.