

# 甘肃农牧交错带土地利用和碳储量的时空演变及预测

王 曼<sup>1</sup>, 燕振刚<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>甘肃农业大学理学院, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月31日

## 摘 要

探讨土地利用变化对碳储量时空演变的影响, 对于维持区域碳平衡、助力双碳目标的实现具有重要意义。该研究基于PLUS和InVEST模型, 解析1980~2020年该地区土地利用和碳储量的变化, 模拟2030年四种情景下的时空演变特征。结果表明: 1) 1980~2020年甘肃农牧交错带林地、草地、建设用地和未利用地呈现增长态势, 耕地、水域的面积则呈现减少态势; 2) 2030年, 建设用地在自然发展、生态保护、经济发展和综合发展情景下分别扩张477.21 km<sup>2</sup>、42.99 km<sup>2</sup>、742.04 km<sup>2</sup>和300.57 km<sup>2</sup>, 相比其他情景, 生态保护情景下增速明显变缓; 3) 1980~2020年碳储量呈下降趋势; 相比2020年, 自然发展情景下的碳储量减少3.896 × 10<sup>6</sup> t; 相比自然发展情景, 生态保护、经济发展和综合发展情景碳储量分别增加3.067 × 10<sup>6</sup> t、减少6.029 × 10<sup>5</sup> t、增加2.195 × 10<sup>6</sup> t。研究结果可为农牧交错带土地利用管理决策以及碳储量的提升提供数据支撑, 为区域用地规划提供建议。

## 关键词

农牧交错带, 土地利用, 碳储量, PLUS模型, InVEST模型

## Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Land Use and Carbon Storage in Agro-Pastoral Transitional Zone of Gansu

Man Wang<sup>1</sup>, Zhengang Yan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2025; accepted: May 19<sup>th</sup>, 2025; published: May 31<sup>st</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 王曼, 燕振刚. 甘肃农牧交错带土地利用和碳储量的时空演变及预测[J]. 植物学研究, 2025, 14(3): 188-199.  
DOI: 10.12677/br.2025.143022

## Abstract

Exploring the impact of land use change on the spatio-temporal evolution of carbon storage is of great significance for maintaining the regional carbon balance and contributing to the realization of the dual-carbon goal. Based on the PLUS and InVEST models, the study analyzed the changes in land use and carbon storage in the region from 1980 to 2020 and simulated their spatio-temporal evolution characteristics under four scenarios in 2030. The results showed that: 1) From 1980 to 2020, the forest land, grassland, construction land, and unused land in agro-pastoral transitional zone of Gansu showed an increasing trend, while the area of cultivated land and water area showed a decreasing trend. 2) By 2030, construction land will expand by 477.21 km<sup>2</sup>, 42.99 km<sup>2</sup>, 742.04 km<sup>2</sup>, and 300.57 km<sup>2</sup> under natural development, ecological protection, economic development, and comprehensive development scenarios, respectively. Compared with other scenarios, the growth rate will significantly slow down under ecological protection scenario. 3) The carbon storage showed a downward trend from 1980 to 2020. Compared to 2020, the carbon storage in the natural development scenario has decreased by  $3.896 \times 10^6$  t. Compared to the natural development scenario, the carbon storage in the ecological protection, economic development, and comprehensive development scenarios increased by  $3.067 \times 10^6$  t, decreased by  $6.029 \times 10^5$  t, and increased by  $2.195 \times 10^6$  t. The research results can provide data support for land use management decisions and carbon storage improvement in agro-pastoral transitional zone, and provide suggestions for regional land use planning.

## Keywords

Agro-Pastoral Transitional Zone, Land Use, Carbon Storage, PLUS Model, InVEST Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

CO<sub>2</sub> 的排放已导致全球气候变暖, 然而这一现象也将对人类的可持续发展和生物的多样性造成不容小觑的威胁。为了应对气候变化, 我国于 2020 年提出计划在 2030 年前“碳达峰”, 2060 年前“碳中和”的宏伟蓝图[1]。陆地生态系统所提供的固碳服务是重要的生态系统服务功能, 在吸收温室气体、维持碳平衡以及改善区域环境质量方面发挥着重要的作用[2]。然而土地利用变化却对陆地生态系统的结构造成影响, 进而影响陆地生态系统的固碳能力[3]-[5], 因此土地利用的结构优化就显得尤为重要。通过调整土地利用类型的结构和空间布局来优化土地利用结构[6], 进而减少碳排放, 助力区域乃至全球“双碳”目标的实现[7]。

近年来, 国内外学者就土地利用变化、碳储量的评估及未来情景模拟进行了大量研究。从研究方法上看, 碳储量的评估主要包括实地调查法[8]和模型模拟法[9][10]。实地调查法具有数据精度高、空间异质性解析能力强等特点, 但时间成本高, 工作量大, 适用的区域小, 且不能反映碳储量的动态变化[11]。模型模拟法在评估碳储量时空演变及预测不同情景下的土地利用变化对碳储量的影响方面有着广泛的应用, 其中 InVEST 模型因数据需求量少、操作简便、容易运行等优点被应用较为广泛[12][13], 如 Huang 等[14]、唐娜等[15]、赵方圆等[16]诸多国内外学者均利用 InVEST 模型对研究区的碳储量时空演变进行研究, 表明了 InVEST 模型在土地利用模拟中具有强大的空间分析能力。与之相结合的未来情景模拟模

型有 MCE 模型[17]、CLUE-S 模型[18]-[20]、CA-Markov 模型[21]-[23]、SD 模型[24] [25]、FLUS 模型[26]-[28]以及 PLUS 模型[29]-[31]等。例如, Sun 等[27]耦合 FLUS 和 InVEST 模型预测长株潭城市群 2035 年 3 种情景下的土地利用和碳储量变化, 表明未来发展应该注重区域生态保护政策的实施和土地利用结构的优化; 赵双红等[2]耦合 PLUS-InVEST 模型预测了渭河流域 2030 年 4 种情景下的碳储量变化, 研究结果可为区域土地利用管理决策提供依据。此外, Li 等[32]认为, PLUS 与 InVEST 两个模型的耦合度较高, 是目前进行土地利用变化和碳储量评估预测的有效手段。

甘肃农牧交错带作为北方农牧交错带的典型代表, 其自然地理环境复杂多样, 生态地位特殊, 不仅是甘肃乃至全国的重要生态屏障, 更是维护区域生态平衡与促进可持续发展的关键所在。但由于气候干旱、降水稀少, 加之人类活动的不合理干扰, 甘肃农牧交错带在生态环境方面也面临着诸多挑战。因此, 本研究以甘肃农牧交错带为研究区, 通过 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年五期土地利用数据分析了 1980~2020 年甘肃农牧交错带土地利用的变化特征; 之后从社会因素和自然因素两方面共选取 10 个驱动因子, 运用 PLUS 模型预测 2030 年四种不同发展情景的土地利用变化, 最后结合 InVEST 模型估算其碳储量, 旨在为优化土地利用空间布局、促进“双碳”目标的实现, 以及推动可持续发展提供坚实的科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

甘肃农牧交错带地处黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原交汇地带, 位于甘肃省中南部及东部(33°40'~37°54'N, 101°55'~108°34'E), 是农牧交错带的核心分布区之一。研究区域内海拔相差幅度较大, 介于 1119~4822 m, 地形主要以高原、山地为主; 气候干燥, 年均气温为-10~11℃; 降水主要集中在 7~9 月, 年均降水量为 142~1198 mm。参考陈全功的划定范围[33], 甘肃农牧交错带共包括甘肃省内 7 市 35 县(区); 之后又将其划分为陇东黄土高原沟壑区、陇中黄土丘陵区、青藏高原-黄土高原过渡区和青藏高原东缘高寒区[34]。

2.2. 数据与来源

数据来源和获取方式如表 1 所示。选取 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年共 5 期的甘肃农牧交错带土地利用数据, 利用 ArcGIS 将数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个一级地类。选取 GDP 数据、人口数据、公路、铁路、高程、坡度、坡向、土壤类型、年平均气温和年平均降水量, 作为土地利用变化驱动因子。坡度数据是高程数据借助 ArcGIS 坡度分析工具而获得, 坡向数据是高程数据借助 ArcGIS 坡向分析工具而获得; 公路、铁路数据则是经过 ArcGIS 中的欧氏距离而获得。对以上数据进行整理后, 将其统一坐标系为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N。

Table 1. Data information and sources  
表 1. 数据信息与来源

| 数据类型 |      | 数据名称                                         | 数据来源                                                                              |
|------|------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 基础数据 | 土地利用 | 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 5 期土地利用数据 | 中国科学院资源环境科学与数据中心<br>( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> ) |
|      |      | GDP 数据                                       | 中国科学院资源环境科学与数据中心<br>( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> ) |
| 驱动因子 | 社会因素 | 人口数据                                         |                                                                                   |
|      |      | 公路                                           | 全国地理信息资源目录服务系统<br>( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> ) |
|      |      | 铁路                                           |                                                                                   |

续表

|      |        |                                                                               |
|------|--------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 自然因素 | 高程     | 地理空间数据云( <a href="https://www.gscloud.cn">https://www.gscloud.cn</a> )        |
|      | 坡度     | ArcGIS 软件计算生成                                                                 |
|      | 坡向     |                                                                               |
|      | 土壤类型   | 中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> ) |
|      | 年平均气温  | 地球资源数据云( <a href="http://www.gis5g.com/">http://www.gis5g.com/</a> )          |
|      | 年平均降水量 |                                                                               |

2.3. 研究方法

2.3.1. PLUS 模型

PLUS 模型全称斑块生成土地利用变化模拟软件, 是一个用于模拟土地利用变化的计算机模型, 可以预测不同政策和发展情景下土地利用的可能变化。其是将地理信息系统(GIS)技术与土地利用模型相结合, 以模拟和预测土地利用的变化, 通常基于一些假设、参数和数据, 然后运用一定的算法来模拟未来可能的土地利用变化。

2.3.2. 邻域权重

邻域权重系数用于量化不同土地类型在空间上的扩张潜力和能力, 其值越趋近于 1, 则表明该土地类型具有更强的扩张能力或更高的空间扩展潜力; 相反, 数值趋近于 0 则表示扩张能力或空间扩展潜力越弱。依据研究区域的政策导向与气候条件分析, 最终确定耕地的权重为 0.2; 林地的权重为 0.01; 草地的权重为 0.3; 水域的权重为 0.4; 建设用地的权重为 1; 未利用地的权重为 0.5 [35] [36]。

2.3.3. 多情景设置

本研究以《甘肃省国土空间规划(2021~2035 年)》为总体指导性文件, 提出了甘肃农牧交错带自然发展情景、生态保护情景、经济发展情景和综合发展情景, 并利用 ArcGIS 对 2030 年甘肃农牧交错带土地利用格局进行模拟和预测。

- 1) 自然发展情景。延续 2010~2020 年土地利用变化规律, 保持各土地利用类型之间的转换概率不变, 以 10 年为间隔, 运用马尔科夫链预测 2030 年甘肃农牧交错带自然发展情景下的土地利用需求。
- 2) 生态保护情景。加强对林地、草地和水域等生态用地的保护, 同时加强其他用地向生态用地的转化。本情景将林地、草地、水域向建设用地转移的概率降低 50%; 耕地、未利用地向林地、草地、水域转移的概率增加 30%, 耕地向建设用地转移的概率降低 60%。
- 3) 经济发展情景。耕地、林地、草地、水域和未利用地向建设用地发展的概率增加 30%, 建设用地向其他用地类型发展的概率减少 30%。
- 4) 综合发展情景。控制林地、草地、水域、耕地向建设用地转化的概率减少 30%, 未利用地向建设用地转移概率增加 40%, 未利用地向林地、草地发展的概率增加 30%, 建设用地转为草地的概率增加 10%, 以此来模拟兼顾生态保护和经济发展情况下的土地利用格局。

2.3.4. InVEST 模型碳储量模块

碳储量是衡量生态系统固碳效能的一个重要指标, 它反映了生态系统在长时间内积累和储存碳的能力, 它涵盖以下四个方面: 地上、地下、土壤和死亡有机物的碳储量。本文运用 InVEST 模型对甘肃农牧交错带的碳储量进行了详尽的计算。本研究使用的碳密度数据参考了刘洋[37]的研究, 碳密度如表 2 所示。碳储量的计算公式如公式(1)所示:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \tag{1}$$

其中,  $C_{total}$ 、 $C_{above}$ 、 $C_{below}$ 、 $C_{soil}$  和  $C_{dead}$  分别为总碳储量、地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机物碳储量。

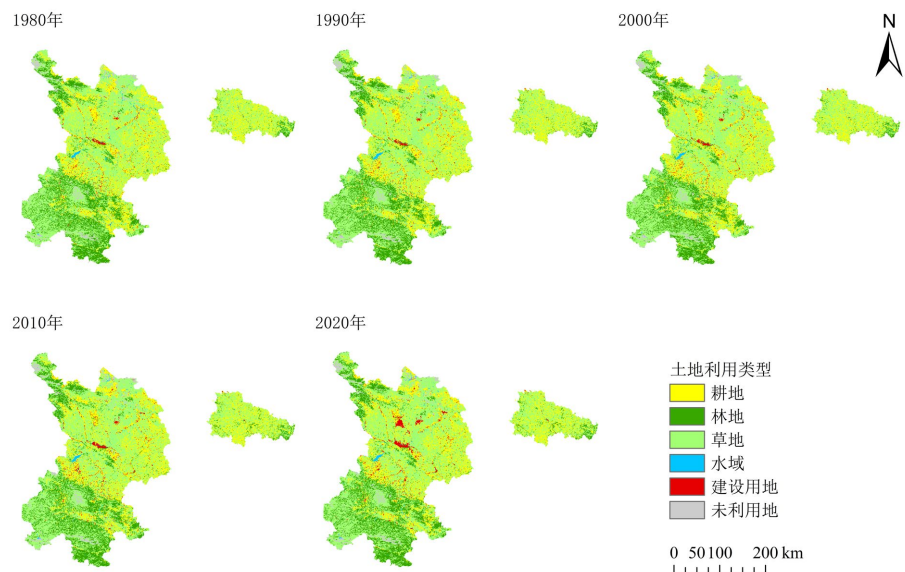
**Table 2.** Carbon density of various land use types (t·hm<sup>-2</sup>)  
**表 2.** 各土地利用类型的碳密度(t·hm<sup>-2</sup>)

| 地类   | 地上    | 地下    | 土壤    | 死亡有机物 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 耕地   | 4.93  | 23.39 | 63.29 | 2.85  |
| 林地   | 28.46 | 7.22  | 74.90 | 4.09  |
| 草地   | 1.00  | 6.42  | 79.98 | 2.11  |
| 水域   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| 建设用地 | 0.72  | 7.97  | 0.00  | 0.00  |
| 未利用地 | 0.38  | 0.00  | 18.98 | 0.00  |

3. 结果与分析

3.1. 1980~2020 年甘肃农牧交错带土地利用时空变化

根据甘肃农牧交错带 1980~2020 年的土地利用分布图(图 1)及土地利用类型面积与占比(表 3)得知, 甘肃农牧交错带土地利用类型按面积从大到小依次为草地、耕地、林地、未利用地、建设用地和水域; 1980~2020 年甘肃农牧交错带的主要土地类型为草地, 分布于各个地区, 整体上草地面积是增加的, 均能达到 55%以上的占比; 耕地整体上的变化趋势是下降的, 下降幅度为 1.66%, 分布范围相对也比较广泛; 林地呈现出先减少后增加的趋势, 集中分布在甘肃农牧交错带的西北角及南部; 未利用地的整体趋势是增加的, 分布于偏北部及中南部; 建设用地在这期间快速扩张, 面积增加 975.59 km<sup>2</sup>, 增幅达 1%, 其扩张集中于陇中黄土丘陵区; 水域占比约 0.63%, 整体呈现下降趋势, 零散分布于样带之间。



**Figure 1.** Land use distribution map in agro-pastoral transitional zone of Gansu from 1980 to 2020  
**图 1.** 1980~2020 年甘肃农牧交错带土地利用分布图



**Table 3.** Area and proportion of land use in agro-pastoral transitional zone of Gansu from 1980 to 2020  
**表 3.** 甘肃农牧交错带 1980~2020 年土地利用面积与比例

| 土地利用<br>类型 | 1980 年             |       | 1990 年             |       | 2000 年             |       | 2010 年             |       | 2020 年             |       |
|------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|            | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  |
| 耕地         | 24506.01           | 25.07 | 24289.60           | 24.85 | 24518.12           | 25.08 | 23467.60           | 24.01 | 22889.09           | 23.41 |
| 林地         | 15512.89           | 15.87 | 15381.73           | 15.74 | 15245.70           | 15.60 | 15809.28           | 16.17 | 15812.49           | 16.18 |
| 草地         | 54020.79           | 55.26 | 54331.67           | 55.58 | 54128.10           | 55.37 | 54156.54           | 55.40 | 54251.31           | 55.50 |
| 水域         | 644.11             | 0.66  | 579.84             | 0.59  | 574.85             | 0.59  | 617.12             | 0.63  | 640.99             | 0.66  |
| 建设用地       | 1089.50            | 1.11  | 1120.76            | 1.15  | 1237.79            | 1.27  | 1519.92            | 1.55  | 2065.09            | 2.11  |
| 未利用地       | 1980.78            | 2.03  | 2050.48            | 2.10  | 2049.54            | 2.10  | 2183.63            | 2.23  | 2095.12            | 2.14  |

3.2. 精度验证

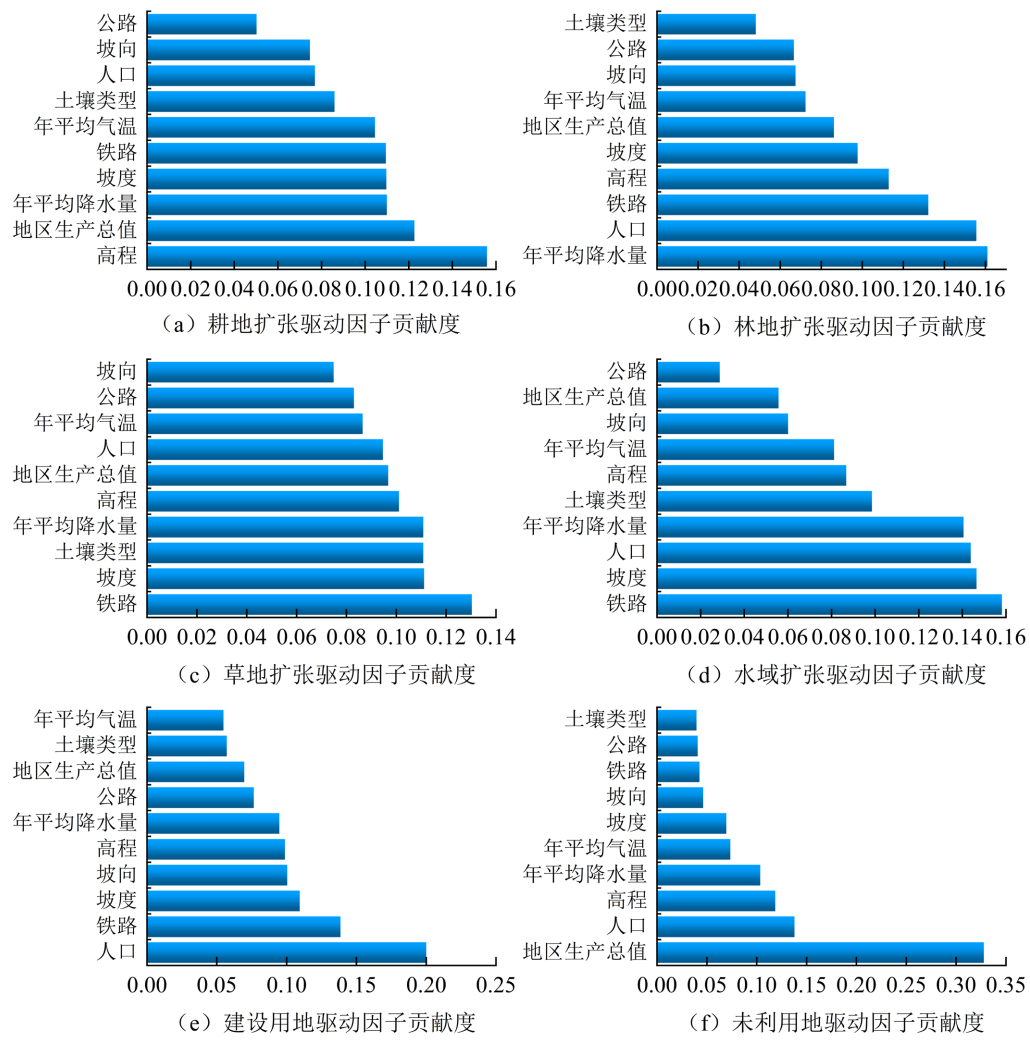
本文使用 PLUS 模型基于 2000 年、2010 年两期土地利用数据预测 2020 年甘肃农牧交错带各类土地的面积，之后将预测的结果与实际的结果进行对比，通过计算可以得出 Overall Accuracy 值和 Kappa 系数分别为 0.9515 和 0.9207，满足本文研究要求。

3.3. 各用地类型扩张的驱动因子贡献度分析

在耕地扩张图中，高程对耕地扩张的影响程度最大，为 0.1558；其次是地区生产总值，为 0.1226。增加的耕地主要分布在低海拔、偏离城市的区域，由此可推断，耕地空间扩张具有向地势低缓，且人类活动影响强度较低区域转移的潜在倾向。在林地扩张图中，年平均降水量对其的影响程度最大，其次是人口。林地扩张区域与耕地相反，主要分布在高海拔区域和研究区东部。在草地和水域的扩张图中，铁路的影响程度均最大，其次为坡度。在建设用地扩张图中，人口的影响程度最大，人口的增长必然推动建设用地的扩张，增加的区域主要集中在研究区中部。在未利用地扩张图中，地区生产总值对其的影响程度最大，为 0.3278，其次是人口(图 2)。

3.4. 不同情景下土地利用空间变化分析

2030 年自然发展情景下的耕地减少 522.25 km<sup>2</sup>，林地减少 0.66 km<sup>2</sup>，草地增加 83.39 km<sup>2</sup>，建设用地增加 477.21 km<sup>2</sup>(表 4)，建设用地的扩张主要来源于耕地，其扩张集中于陇中黄土丘陵区 and 青藏高原 - 黄土高原过渡区(图 3)。2030 年生态保护情景下采取了保护林地、草地等的措施，林地增加 39.53 km<sup>2</sup>，草地增加 479.79 km<sup>2</sup>；此外有效控制了建设用地的扩张，面积增加明显减缓，增加 42.99 km<sup>2</sup>；耕地减少 578.89 km<sup>2</sup>，未利用地减少 115.19 km<sup>2</sup>。该情景下采取了加强对生态用地保护的措施，保护和建设甘肃农牧交错带的生态系统，所以生态保护情景下的水域面积比自然发展情景多了 20.60 km<sup>2</sup>，林地增加 40.19 km<sup>2</sup>，草地增加 396.40 km<sup>2</sup>。2030 年经济发展情景下，耕地减少 513.38 km<sup>2</sup>，林地减少 13.30 km<sup>2</sup>，水域减少 134.12 km<sup>2</sup>，未利用地减少 83.45 km<sup>2</sup>，建设用地增加 742.04 km<sup>2</sup>，该情景下建设用地不断向外扩张，扩张程度是自然发展情景下的 1.55 倍。2030 年综合发展情景下的耕地减少 190.00 km<sup>2</sup>，未利用地减少 113.78 km<sup>2</sup>，林地增加 13.11 km<sup>2</sup>，建设用地增加 300.57 km<sup>2</sup>，表明该情景下大量开发未利用地，开发程度是自然发展情景下的 1.89 倍。



**Figure 2.** Impact of driving factors on expansion by land use types  
**图 2.** 驱动因子对各用地类型扩张的影响

**Table 4.** Land use simulation results in agro-pastoral transitional zone of Gansu in 2030  
**表 4.** 甘肃农牧交错带 2030 年土地利用模拟结果

| 土地利用<br>类型 | 2030 年自然发展情景       |       | 2030 年生态保护情景       |       | 2030 年经济发展情景       |       | 2030 年综合发展情景       |       |
|------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|            | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  |
| 耕地         | 22366.84           | 22.88 | 22310.19           | 22.82 | 22375.70           | 22.89 | 22698.09           | 23.22 |
| 林地         | 15811.83           | 16.18 | 15852.02           | 16.22 | 15799.19           | 16.16 | 15825.60           | 16.19 |
| 草地         | 54334.70           | 55.58 | 54731.10           | 55.99 | 54253.53           | 55.50 | 54241.42           | 55.49 |
| 水域         | 663.38             | 0.68  | 683.98             | 0.70  | 506.87             | 0.52  | 641.97             | 0.66  |
| 建设用地       | 2542.30            | 2.60  | 2196.87            | 2.25  | 2807.13            | 2.87  | 2365.67            | 2.42  |
| 未利用地       | 2035.04            | 2.08  | 1979.92            | 2.03  | 2011.67            | 2.06  | 1981.34            | 2.03  |

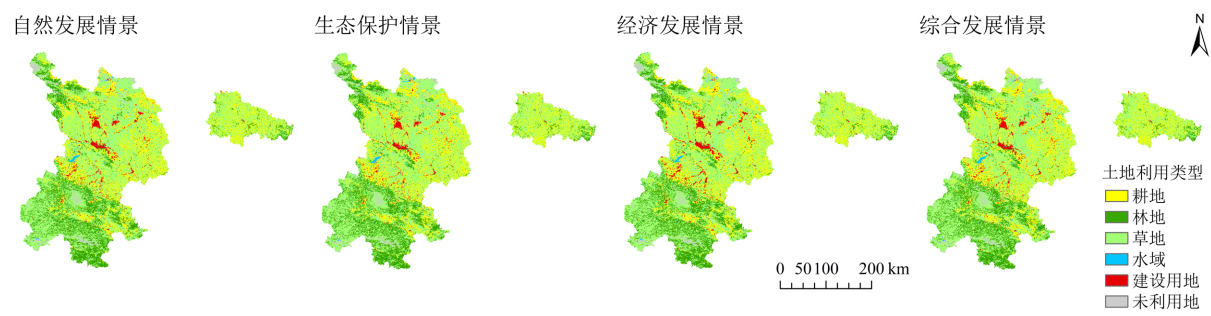


Figure 3. Land use scenario simulation in agro-pastoral transitional zone of Gansu in 2030  
图 3. 甘肃农牧交错带 2030 年土地利用情景模拟

3.5. 甘肃农牧交错带土地利用变化对碳储量的影响

1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年甘肃农牧交错带的总碳储量分别为  $9.022 \times 10^8$  t、 $9.017 \times 10^8$  t、 $9.006 \times 10^8$  t、 $8.979 \times 10^8$  t、 $8.936 \times 10^8$  t (表 5)，呈现出下降的趋势，不同时期甘肃农牧交错带碳储量的空间分布大致是相同的，总体呈现“西北高 - 中间低 - 南部高”的两高一低的空间分布格局 (图 4)。1980~2020 年期间总计减少  $8.624 \times 10^6$  t，降幅达 0.96%，其中耕地流失导致总碳储量损失了  $1.546 \times 10^7$  t，林地、草地、建设用地、未利用地分别增加了  $3.675 \times 10^6$  t、 $2.109 \times 10^6$  t、 $8.492 \times 10^5$  t、 $2.062 \times 10^5$  t。甘肃农牧交错带虽采取保护生态用地等措施增加了林地及草地的面积，保护了林地及草地的固碳，增加了碳储量，但与此同时也导致耕地的碳储量大量流失。此外，2010~2020 年碳储量下降幅度最大，减少了  $4.303 \times 10^6$  t，占总降幅的 49.89%。

通过 PLUS 模型获得 2030 年四种不同情景的土地利用数据，之后再借助 InVEST 模型来获得 2030 年四种不同情景的碳储量预测结果 (图 5)。自然发展情景下，相比于 2020 年碳储量减少  $3.896 \times 10^6$  t，其原因主要由于草地和建设用地侵占耕地，导致耕地碳储量大幅下降，减少  $4.933 \times 10^6$  t，虽草地、建设用地的碳储量小幅增加，但不足以抵消耕地减少的碳储量，最终导致碳储量减少。生态保护情景下，碳储量较自然发展情景高出  $3.067 \times 10^6$  t，其中草地的碳储量为  $4.922 \times 10^8$  t，在碳储量的供给上扮演着重要的角色，是主要的供给来源。此外，该情景下的碳储量高于其他情景，这主要是因为生态保护情景下注重对林地、草地的保护，其他地类转化为林地、草地，同时控制建设用地的扩张。经济发展情景下，碳储量较自然发展情景低  $6.029 \times 10^5$  t，低于其他情景，其原因主要由于建设用地无序扩张，侵占其他用地，从而导致碳储量下降。其中耕地的碳储量为  $2.123 \times 10^8$  t，高于自然发展情景下耕地的碳储量，但林地、草地的碳储量下降，就碳储量的结果而言，耕地的增多并不能完全弥补林地和草地减少导致的损失。综合发展情景下，较自然发展情景增加  $2.195 \times 10^6$  t，涨幅达 0.25%。耕地碳损失在所有情景中最小，为  $1.804 \times 10^6$  t；较其他 3 个情景相比，草地由碳固持转为碳流失，但损失量较小。

Table 5. Carbon storage of various land use types from 1980 to 2030 ( $\times 10^7$  t)  
表 5. 1980~2030 年各土地利用类型碳储量 ( $\times 10^7$  t)

| 地类 | 1980 年 | 1990 年 | 2000 年 | 2010 年 | 2020 年 | 2030 年 |       |       |       |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
|    |        |        |        |        |        | ND     | EP    | ED    | CD    |
| 耕地 | 23.26  | 23.04  | 23.26  | 22.27  | 21.71  | 21.22  | 21.17 | 21.23 | 21.53 |
| 林地 | 17.90  | 17.77  | 17.61  | 18.27  | 18.27  | 18.27  | 18.31 | 18.25 | 18.28 |
| 草地 | 48.58  | 48.86  | 48.68  | 48.70  | 48.79  | 48.86  | 49.22 | 48.79 | 48.78 |



续表

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 水域   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| 建设用地 | 0.09  | 0.10  | 0.11  | 0.13  | 0.18  | 0.22  | 0.19  | 0.24  | 0.21  |
| 未利用地 | 0.39  | 0.40  | 0.40  | 0.43  | 0.41  | 0.40  | 0.39  | 0.39  | 0.39  |
| 总碳储量 | 90.22 | 90.17 | 90.06 | 89.79 | 89.36 | 88.97 | 89.27 | 88.91 | 89.19 |

注: ND 为自然发展情景, EP 为生态保护情景, ED 为经济发展情景, CD 为综合发展情景。

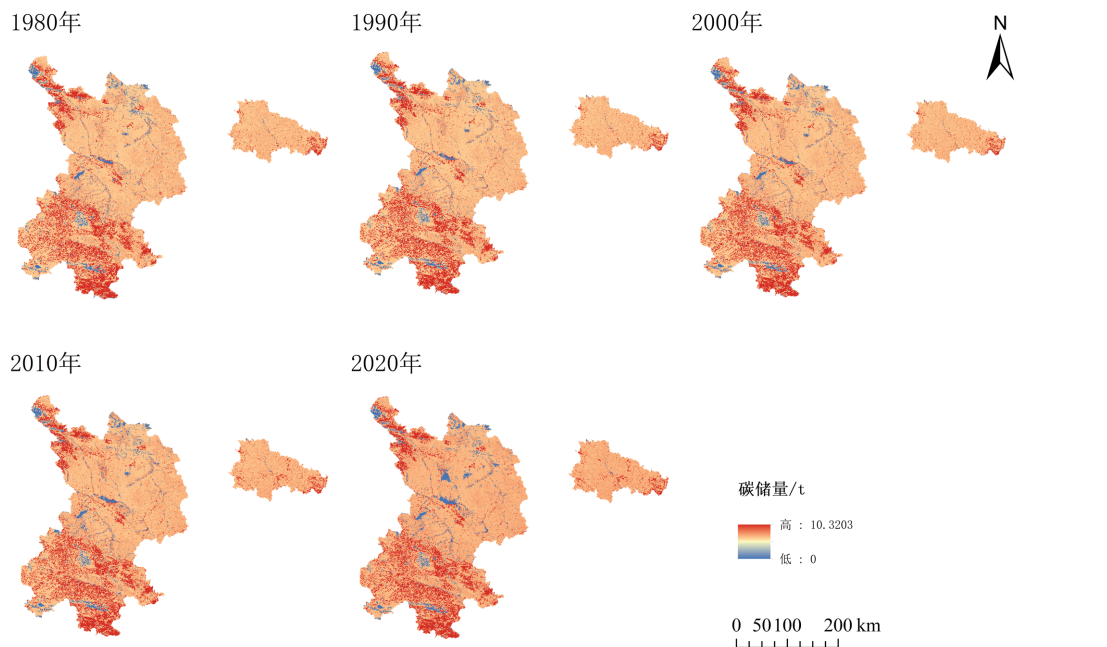


Figure 4. Spatial distribution of carbon storage from 1980 to 2020  
图 4. 1980~2020 年碳储量空间分布

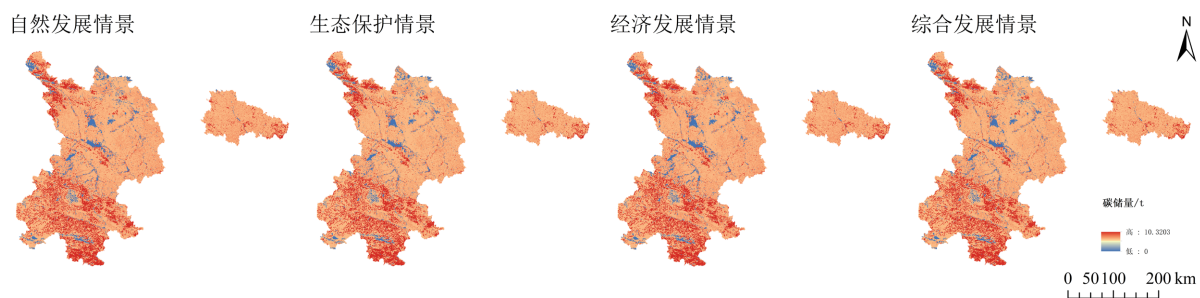


Figure 5. Spatial distribution of carbon storage for different scenarios in 2030  
图 5. 2030 年不同情景的碳储量空间分布

4. 讨论

4.1. 模拟精度对结果的影响

本研究基于甘肃农牧交错带 2000 年、2010 年两期土地利用数据, 通过 PLUS 模型对甘肃农牧交错带 2020 年土地利用数据进行模拟, 并将模拟的结果与真实的结果进行对比, 经检验本研究的 Overall Accuracy

值和 Kappa 系数分别为 0.9515 和 0.9207, 参考孙冰清[38]的黄河流域陆地生态系统碳储量的时空演变特征及预测研究中提到 Kappa 系数大于 0.75 时, 仿真结果良好, 具有较好的可靠性和可行性。但本研究在选取 PLUS 模型预测未来的土地利用时, 驱动因子的选择有限, 只考虑了社会因素和自然因素, 而没有考虑实际现实中各种社会政策及动态经济政策的影响, 这可能会影响模型的模拟结果, 因此在以后的研究中应把各种政策的影响考虑进去, 应尽可能多地对驱动因素的选择进行实验研究, 来提高模型的精确性[39]。

## 4.2. InVEST 模型对研究结果的影响

InVEST 模型所需要的碳密度值是参考刘洋[37]的黄河流域生态系统服务及其权衡协同关系特征的研究, 并且假设碳密度值是恒定的; 实际情况却是随着时间的变化、环境的变化、人为因素等其他因素的影响, 碳密度值也会发生改变, 因此, 在以后的研究中应充分考虑对碳密度值造成影响的可能因素, 进行实地考察、实地测量, 来获得真实准确的碳密度值, 提高模型的精确性。此外, InVEST 模型具有静态性特征, 本研究未能对碳源/汇的动态过程进行模拟。静态模拟可能限制了我们对于碳源/汇时空变化特征的理解, 例如无法捕捉土壤有机碳的分解速率、植被碳的季节性变化以及碳通量的年际波动。因此, 未来研究可结合动态模型进行补充, 以更全面地评估区域碳源/汇的动态特征。

## 4.3. 土地利用类型变化对碳储量的影响

土地利用类型之间的不断转化是碳储量发生变化的主要原因, 例如, 在 2030 年四种不同情景下, 生态保护情景下的碳储量最高, 主要原因是林地和草地的转入, 即碳密度低的土地类型转换为了碳密度高的土地类型。但过去发展过程中, 为了经济快速发展, 建设用地不断扩张, 侵占了其他的土地类型, 进而造成了碳储量下降。之后开始实施退耕还林政策, 至今已取得了显著的成效。在今后的发展过程中, 甘肃农牧交错带仍要保护林地、草地这些高碳密度值的土地类型, 以此提高碳储量。

## 5. 结论

1) 甘肃农牧交错带土地利用类型以草地为主, 其面积占比均能达到总面积的 55%以上, 其次分别为耕地、林地、未利用地、建设用地和水域。1980~2020 年期间, 甘肃农牧交错带的耕地、水域整体上呈现下降的趋势, 林地、草地、建设用地和未利用地整体上则呈现增加的趋势。

2) 2030 年, 自然发展情景下, 建设用地不断扩张, 面积增加 477.21 km<sup>2</sup>。生态保护情景下, 有效控制了建设用地的扩张, 面积增加减缓, 增加 42.99 km<sup>2</sup>, 林地、草地、水域面积增加。经济发展情景下, 建设用地不断向外扩张, 增加 742.04 km<sup>2</sup>, 扩张程度是自然发展情景下的 1.55 倍。综合发展情景下, 建设用地增加 300.57 km<sup>2</sup>, 扩张程度低于自然发展情景和经济发展情景。

3) 1980~2020 年, 碳储量呈下降趋势, 共减少  $8.624 \times 10^6$  t。自然发展情景下, 2030 年的碳储量较 2020 年减少  $3.896 \times 10^6$  t。生态保护情景下, 2030 年的碳储量比自然发展情景高  $3.067 \times 10^6$  t, 该情景下的碳储量高于其他情景。经济发展情景下, 2030 年的碳储量比自然发展情景低  $6.029 \times 10^5$  t。综合发展情景下, 2030 年的碳储量比自然发展情景高  $2.195 \times 10^6$  t, 涨幅达 0.25%。

## 基金项目

甘肃省重点研发计划项目(21YF5FA095); 甘肃省科技计划项目软科学专项(23JRZA450); 甘肃省财政厅项目(GSCZZ-20160909-03); 甘肃省高校教师创新基金项目(2023B-081)。

## 参考文献

- [1] Yu, Y., Guo, B., Wang, C., Zang, W., Huang, X., Wu, Z., *et al.* (2023) Carbon Storage Simulation and Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Ca-Plus Model under Dual-Carbon Background. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*,

- 14, Article ID: 2173661. <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2173661>
- [2] 赵双红, 周冬梅, 王得梅, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的渭河流域生态系统碳储量评估及多情景预测[J]. 应用生态学报, 2024, 35(8): 2044-2054.
- [3] 甄婷, 崔秀萍, 刘宇, 等. 呼和浩特市多情景生态系统碳储存及碳汇价值研究[J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1555-1564.
- [4] 张龙江, 陈国平, 林伊琳, 等. 基于 MOP-PLUS-InVEST 模型的碳储量多情景模拟及驱动机制分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 223-233.
- [5] 游欣, 冯晓菁, 魏绪英, 等. 南昌市土地利用碳储量变化及多情景预测[J]. 南方林业科学, 2024, 52(5): 30-38.
- [6] 杨皓然, 吴群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 121-126.
- [7] 赵清旭, 秦立达. 绿色低碳导向的土地利用结构优化配置研究分析[J]. 西部资源, 2020(1): 138-140.
- [8] 谢晨新, 张守红, 李华林, 等. 1987-2020 年昕水河流域土地利用变化对碳储量的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8021-8032.
- [9] 罗义, 刘伟强, 董一凡, 等. 多情景下张家口市土地利用变化及碳储量分析[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(6): 200-212.
- [10] 温芮, 高燕燕, 吴志豪, 等. 关中平原城市群土地利用变化对碳储量时空格局的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(4): 592-604.
- [11] 李茂娟, 李天奇, 朱文博, 等. 基于 InVEST 模型的太行山区生态系统碳储量多维变化研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 631-642+684.
- [12] 高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 等. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1001-1013.
- [13] 孙晓雨, 杨金明, 张家豪, 等. 五台山风景名胜区土地利用变化及其对生境质量的影响[J]. 自然保护地, 2024, 4(2): 124-140.
- [14] Huang, S., Wu, D., Pan, Y., Lin, J. and Zhou, P. (2024) A Study on the Spatiotemporal Dynamics of Land Cover Change and Carbon Storage in the Northern Gulf Economic Zone of Guangxi Based on the Invest Model. *Atmosphere*, **15**, Article No. 1332. <https://doi.org/10.3390/atmos15111332>
- [15] 唐娜, 张震域, 廉耀康, 等. 基于 InVEST 模型的黑河流域碳储量时空变化分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(8): 99-103, 122.
- [16] 赵方圆, 王琼芳, 张华堂, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃省祁连山林区乔木林碳储量时空变化研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(4): 233-240.
- [17] 蒋贵彦. 基于 GIS 和 MCE-CA-Markov 模型的高原河谷型城市土地利用变化研究与模拟预测[J]. 青海科技, 2023, 30(4): 184-191.
- [18] 魏伟, 颜耀文, 魏晓旭, 等. 基于 CLUE-S 模型和生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1306-1315.
- [19] 王萍, 林乐乐, 彭杨靖, 等. 基于 CLUE-S 模型的浙江省土地利用结构变化趋势分析[J]. 生态科学, 2024, 43(3): 196-206.
- [20] Jiang, W., Deng, Y., Tang, Z., Lei, X. and Chen, Z. (2017) Modelling the Potential Impacts of Urban Ecosystem Changes on Carbon Storage under Different Scenarios by Linking the CLUE-S and the Invest Models. *Ecological Modelling*, **345**, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.12.002>
- [21] 张锦, 张新艳, 张文广, 等. 不同情景下松花江上游碳储量动态变化及碳汇潜力[J]. 生态学杂志, 2024, 43(9): 2684-2693.
- [22] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1018-1029.
- [23] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [24] Ma, S., Huang, J., Wang, X. and Fu, Y. (2025) Multi-Scenario Simulation of Low-Carbon Land Use Based on the SD-FLUS Model in Changsha, China. *Land Use Policy*, **148**, Article ID: 107418. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107418>
- [25] Xu, Q. and Li, K. (2024) Multi-Scenario Simulation of Land Use and Assessment of Carbon Stocks in Terrestrial Ecosystems Based on SD-PLUS-InVEST Coupled Modeling in Nanjing City. *Forests*, **15**, Article No. 1824.

- <https://doi.org/10.3390/f15101824>
- [26] 李雪, 李文, 高宇. 基于 FLUS-InVEST 模型的大庆市土地覆盖模拟与碳储量评估[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5983-5993.
- [27] Sun, W. and Liu, X. (2024) Spatio-Temporal Evolution and Multi-Scenario Prediction of Ecosystem Carbon Storage in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration Based on the FLUS-InVEST Model. *Sustainability*, **16**, Article No. 7025. <https://doi.org/10.3390/su16167025>
- [28] Yang, J., Xie, B., Zhang, D., Mak-Mensah, E. and Pei, T. (2023) Habitat Quality Assessment and Multi-Scenario Prediction of the Gansu-Qinghai Section of the Yellow River Basin Based on the FLUS-InVEST Model. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **11**, Article 1228558. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1228558>
- [29] 李冰洁, 范志韬, 曲芷程, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的黄河流域内蒙古段生态系统碳储量评价及预测[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1217-1227.
- [30] 黄韬, 刘素红. 基于 PLUS-InVEST 模型的福建省土地利用变化与碳储量评估[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 246-257.
- [31] Chen, J., Kasimu, A., Reheman, R., Wei, B., Han, F. and Zhang, Y. (2024) Temporal and Spatial Variation and Prediction of Water Yield and Water Conservation in the Bosten Lake Basin Based on the PLUS-InVEST Model. *Journal of Arid Land*, **16**, 852-874. <https://doi.org/10.1007/s40333-024-0101-4>
- [32] Li, Y., Yao, S., Jiang, H., Wang, H., Ran, Q., Gao, X., *et al.* (2022) Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage: An Integrated Framework Based on the MOP-PLUS-InVEST Model and an Applied Case Study in Hangzhou, East China. *Land*, **11**, Article No. 2213. <https://doi.org/10.3390/land11122213>
- [33] 陈全功. 再谈“胡焕庸线”及农牧交错带[J]. 草业科学, 2018, 35(3): 669-676.
- [34] 任利广, 马维伟, 李广, 等. 基于 GIS 的甘肃省农牧交错带土地沙化敏感性时空分布格局[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 149-156.
- [35] 李阜鹏, 韩惠, 杨树文. 甘肃省 2000-2020 年土地利用变化分析及基于 PLUS 的生态空间多情景模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6316-6326.
- [36] 周满意, 王承武. 基于 PLUS 模型的乌鲁木齐市“三生”空间多情景模拟[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 4021-4030.
- [37] 刘洋. 黄河流域生态系统服务及其权衡协同关系特征[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- [38] 孙冰清. 黄河流域陆地生态系统碳储量变化机制及预测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国环境科学研究院, 2023.
- [39] Liang, X., Guan, Q., Clarke, K.C., Liu, S., Wang, B. and Yao, Y. (2021) Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, **85**, Article ID: 101569. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569>