

doi: 10.12097/gbc.2022.07.023

近 30 年西北内陆荒漠资源大区土地利用驱动下 生态系统碳储量时空变化

付宇佳^{1,2}, 刘晓煌^{2*}, 孙兴丽³, 刘玖芬², 郑艺文^{2,4}, 张子凡^{2,5}, 赖明^{2,6}, 熊茂秋^{2,6}
FU Yujia^{1,2}, LIU Xiaohuang^{2*}, SUN Xingli³, LIU Jiufen², ZHENG Yiwen^{2,4}, ZHANG Zifan^{2,5},
LAI Ming^{2,6}, XIONG Maoqiu^{2,6}

1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055;

3. 河北地质大学自然资源资产资本研究中心, 河北 石家庄 050031;

4. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;

5. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

6. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074

1. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Beijing 100055, China;

3. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

4. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;

5. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;

6. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 依据 1990—2020 年遥感影像、高程模型、植被、气象等数据,通过定量计算与定性分析相结合的区划分析,获取西北内陆荒漠资源大区的自然资源综合区划。根据西北内陆荒漠资源大区气候因子对全国水平下不同土地类型的碳密度进行修正,获取西部干旱区碳密度数据,利用 InVEST 模型,分析 1990—2020 年土地利用变化对碳储量的影响。结果表明:①近 30 a 来该研究区以草地退化为主,耕地和荒漠是草地主要转出的类型,其中 2010—2020 年土地利用类型变化显著;②研究区碳储量呈现西多东少的空间分布,其中西部阿尔泰山与塔城盆地温带草原亚区和伊犁盆地温带草原亚区由于草地面积较丰富而碳储量较高;③1990—2020 年西北内陆荒漠资源大区的碳储量总体呈波动下降趋势,土地利用类型的转化引起碳储量净减少 1.86×10^8 t,其中 2000 年和 2020 年研究区大量草地转化为荒漠,使土壤碳储量明显下降,固碳潜力有所下降。本次对西北内陆荒漠资源大区土地利用对生态系统碳储量时空变化的评估,有助于判断生态系统功能的转化趋势,为生态系统调控和促进该地区低碳可持续发展提供参考。

关键词: 土地利用变化;生态系统碳储量;InVEST 模型;西北地区

中图分类号: X171.1; P96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)02/03-0451-12

Fu Y J, Liu X H, Sun X L, Liu J F, Zheng Y W, Zhang Z F, Lai M, Xiong M Q. Spatial-temporal variation of ecosystem carbon storage driven by land use in northwest inland desert resource region in recent 30 years. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 451-462

Abstract: Based on remote sensing images, elevation models, vegetation and meteorological data from 1990 to 2020, the

收稿日期: 2022-07-23; 修订日期: 2023-02-06

资助项目: 中国地质调查局项目《塔里木河流域巴州北部沙漠盐渍化与生态恢复调查监测与评价》(编号: ZD20220144)、《新疆典型生态系统综合全参数观测建设》(编号: 2021xjkk140104)

作者简介: 付宇佳(1997-), 女, 在读硕士生, 从事自然资源学、地理信息系统和遥感技术应用研究。E-mail: fuyujia@cug.edu.cn

* 通信作者: 刘晓煌(1972-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事自然资源学、基础地质学和矿床学研究。E-mail: liuxh19972004@163.com

comprehensive regionalization of natural resources in northwest inland desert resource region was obtained by means of regionalization analysis combining quantitative calculation and qualitative analysis. According to the climate factors in the northwest inland desert resource region, the carbon density of different land types under the national level was revised to obtain the carbon density data of the western arid region. Based on the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) model, we analyzed the effects of land use change on carbon stocks from 1990 to 2020. The results showed that: ① In recent 30 years, the grassland in this study area was mainly degraded, and the grassland was mainly transformed into cultivated land and desert, and the land use type changed significantly from 2010 to 2020. ② The spatial distribution of carbon storage in the study area is more in the west and less in the east. The grassland in Altai and Tacheng basin temperate grassland subregion and Yili Basin temperate grassland subregion are rich, so the carbon storage content is high. ③ From 1990 to 2020, the carbon storage in the northwest inland desert resource region showed a decreasing trend. The conversion of land use type resulted a net reduction of carbon storage of 1.86×10^8 tons. In 2000 and 2020, a large amount of grassland in the study area was transformed into desert, which significantly reduced soil carbon storage and carbon sequestration potential. This study evaluated the temporal and spatial changes of ecosystem carbon storage by land use in the northwest inland desert resource region, which is helpful to judge the transformation trend of ecosystem function and provide reference for ecosystem regulation and promoting low-carbon sustainable development in this region.

Key words: land use change; ecosystem carbon storage; InVEST model; Northwest China

全球气候变化背景下,中国在第七十五届联合国大会上指出力争 2030 年实现“碳达峰”,2060 年实现“碳中和”。促进碳吸收,即提升陆地生态系统固碳能力是实现碳中和的重要途径之一(李勇等, 2021)。陆地生态系统碳的主要来源是地上和地下生物量、土壤和死亡有机质(高扬等, 2013),植被作为主要的表现形式,其分布直接影响着陆地生态系统碳储量大小(谢立军等, 2023)。土地利用的变化不仅改变了土地利用覆盖的格局、陆地生态系统结构、过程和功能,以及影响生态系统的物质循环和能量流动(马晓哲等, 2015; 翟羽娟等, 2022),也改变了植被和土壤中二氧化碳的储存,影响了陆地生态系统碳汇能力(廖艳等, 2012; Liu et al., 2023)。由于不同类型土地的固碳能力存在很大差异,量化土地利用变化与碳储量之间的关系对生态系统碳储存相关研究、区域可持续发展及减缓全球气候变化具有重大意义(曲福田等, 2011; 陈宁等, 2023)。早期学者(王绍强等, 2000; 王效科等, 2001)通过森林、土壤普查的方式获取土壤和森林数据资料进行研究,刘国华等(2000)依据森林种类生物量和蓄积量构建回归方程的方式推算中国森林碳储量;葛全胜等(2008)以 7 次清查数据和全国第二次土壤普查数据为基础,利用“薄记”模型分析了土地变化与碳储量的关系。随着遥感技术的发展,有学者建立了用于估算植被净初级生产力的 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型(Potter et al., 1993),并对河西走廊、内蒙古草原、甘肃(周涛等, 2006; 张峰等, 2008; 柳梅英等, 2010; 揣小伟等, 2011; 冯益明等, 2014; 李传华

等, 2019)等地区开展了净初级生产力(Net Primary Production, NPP)估算。近期,大量学者运用 InVEST 模型对碳储量展开研究(刘晓娟等, 2019; 卢雅焱等, 2022; 张楚强等, 2022),该模型不仅可以研究植被碳储量,还可以弥补 CASA 模型对土壤碳储量研究的缺失,只需要一定的调查观测数据就可以直接可视化表达碳储量的空间分布。

鉴于此,本次选取自然资源综合区划(张海燕等, 2020)中存在土地荒漠化、水土流失、草地退化等严重生态问题(刘海霞等, 2016)、土地利用类型变化明显的西北内陆荒漠资源大区展开研究,探究西北地区近 30 a 来土地利用的变化及相互转化情况,分析土地利用变化对碳储量的影响,掌握区域内土地类型的空间格局,利于调控西北地区土地利用转型方向,研判转化态势,及时调控转化方向,开展退牧还草、草原退化修复等治理工程,使该地区土地利用类型向既有利于经济发展又可提高固碳增汇的方向转变,为国土规划和生态环境修复提供依据,使该地区的土地类型既能保证经济的可持续发展,又能满足区域的低碳发展需求。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

西北内陆荒漠资源大区是中国自然资源综合分区之一,位于中国西北部内陆地区,包括新疆维吾尔自治区、甘肃省北部、内蒙古自治区东部和宁夏回族自治区北部。研究区是在张海燕等(2020)研究的全

国自然资源区划基础上进一步划分的 12 个资源大区之一。西北内陆荒漠资源大区 (X) 总面积约 $178.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国陆地面积的 18.70%, 包含 7 个自然资源亚区, 分别为阿尔泰山与塔城盆地温带草原亚区 (X1)、准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2)、伊犁盆地温带草原亚区 (X3)、塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4)、吐鲁番盆地温带荒漠亚区 (X5)、南疆平原温带荒漠亚区 (X6) 和阿拉善高原温带荒漠亚区 (X7)(图 1)。

西北内陆荒漠资源大区深居内陆, 距海遥远, 以高原、山地地形为主, 区域内山脉和盆地相间, 涵盖阿尔泰山、昆仑山、天山等山脉, 塔里木、吐鲁番、准噶尔等盆地, 分布着中国最大的沙漠——塔克拉玛干沙漠(宋佳颖, 2021)。该地区地形阻挡了湿润的气流, 导致本区降水稀少、气候干旱, 自然景观多为广袤的沙漠和戈壁沙滩。该大区自然景观从东到西按照大类可分为戈壁沙滩、荒漠草原、戈壁荒漠, 全区荒漠面积约 $119.10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占该大区总面积的 66.80%。该大区大部分属中温带和暖温带大陆性半干旱、干旱气候, 局部属于高寒气候, 冬季严寒而干

燥, 夏季高温且降水稀少, 全域年均降水量约 127 mm, 年均气温约 8.26°C 。

1.2 数据来源

本研究依据的基本数据有: 中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 4 期土地利用(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)遥感影像数据; 数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、植被、流域等数据。其中, 植被数据是在遥感数据与气象数据的基础上, 运用光能利用率模型 (Carnegie Ames Stanford Approach, CASA) 模拟得到的植被净初级生产力数据 (Net Primary Productivity, NPP) 和归一化差分植被指数数据 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 气象数据主要为 1990—2020 年 1 km 分辨率的逐月平均气温数据和年降水量数据, 其中 DEM、植被、流域等数据主要为区划的基础数据。借鉴相关研究成果(黄莉等, 2021; 赖明等, 2021; 张子凡等, 2021; 郑艺文等, 2021), 结合《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》中的二级分类标准, 利用 ArcGIS 10.2 软件

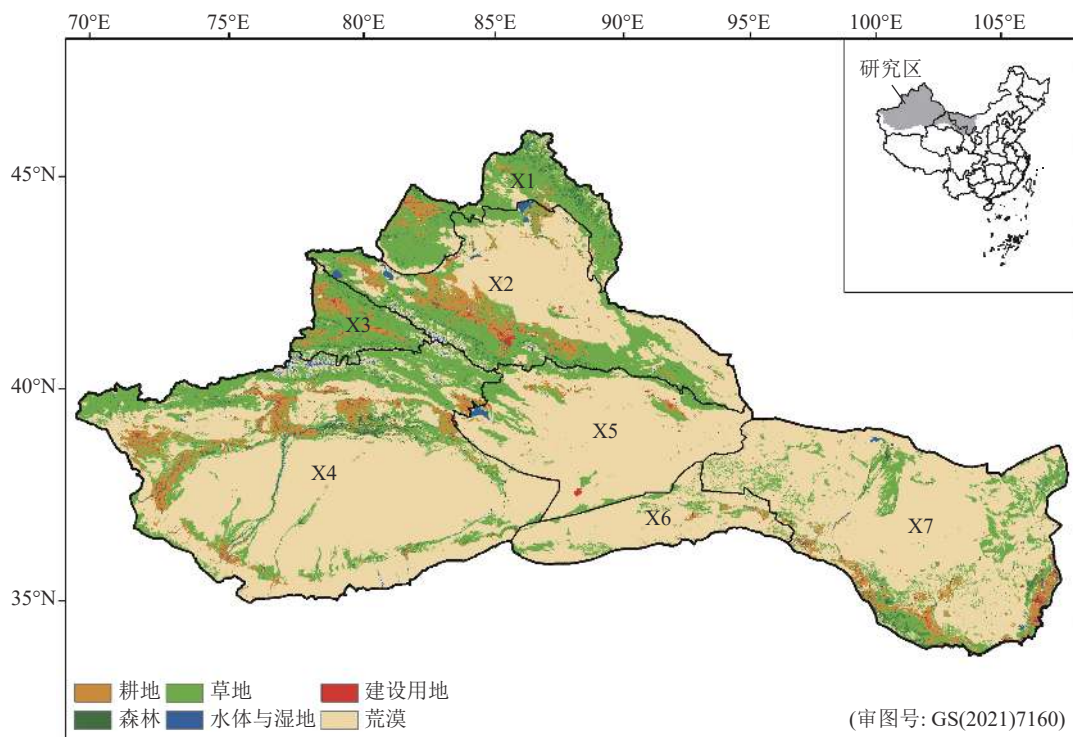


图 1 西北内陆沙漠资源大区 2020 年土地利用类型图

Fig. 1 Land use type map of the northwest inland desert resource region in 2020

X1—阿尔泰山与塔城盆地温带草原亚区; X2—准噶尔盆地温带荒漠亚区; X3—伊犁盆地温带草原亚区; X4—塔里木盆地温带荒漠亚区; X5—吐鲁番盆地温带荒漠亚区; X6—南疆平原温带荒漠亚区; X7—阿拉善高原温带荒漠亚区

平台将西北内陆荒漠大区 25 个二级地类合并为耕地、森林、草地、水体与湿地、建设用地和荒漠 6 个大类。碳密度主要通过查阅文献,并根据西北内陆荒漠大区的气候条件,对该地区碳密度进行修正,得到西北内陆荒漠大区各土地利用类型的碳密度。

2 研究方法

2.1 土地变化分析

2.1.1 土地利用动态度

土地利用动态度可以表达区域内土地资源数量转变的速度,包含单一土地利用类型及综合土地利用类型的动态度(王秀兰等, 1999)。

(1) 单一土地利用类型动态度

单一土地利用类型动态度指某研究区一定时间范围内某类土地利用类型的数量变化情况,表达式为:

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

式中: K 为一定时间内某类土地利用类型的动态度; U_a 为研究期初某类土地利用类型的数量; U_b 为研究期末某类土地利用类型的数量; T 为研究时长(a)。

(2) 综合土地利用类型动态度

某研究区内综合土地利用动态度可定量表示研究区内各类土地的变化速度,表达式为:

$$LC = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: LU_i 为研究初期第 i 类土地利用类型的面积(hm^2); ΔLU_{i-j} 为研究期内第 i 类土地利用类型转为非 i 类土地利用类型面积的绝对值(hm^2); n 为土地利用类型数量; T 为研究时长(a)。

2.1.2 土地利用转移矩阵

运用 ArcGIS 10.2 软件,对西北内陆荒漠资源大区 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 4 期土地利用数据进行空间叠加分析,并利用空间统计功能统计分析,得到 1990—2020 年土地利用的动态变化和转移矩阵,最后根据转移矩阵分析及计算 4 个时段土地利用的转化趋势和时空变化情况。

2.2 碳储量计算模型

2.2.1 InVEST 碳储量估算模型

InVEST 模型是由美国斯坦福大学、大自然保护

协会(TNC)与世界自然基金会(WWF)联合开发的,可以直观、可视化表达生态系统服务功能价值(杨园园等, 2012)。该模型可以模拟不同土地覆被情景下生态服务系统物质和价值量的变化,为决策者权衡人类活动的效益和影响提供科学依据。陆地生态系统碳储量模块主要是通过估算地上生物量、地下生物量、土壤有机质和死亡有机质四大基本碳库计算的。碳储量计算表达式为:

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead} \quad (3)$$

式中: C_i 为第 i 类土地利用类型的综合碳密度; C_{i_above} 、 C_{i_below} 、 C_{i_soil} 、 C_{i_dead} 分别为第 i 类土地利用的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤有机质碳密度及死亡有机质碳密度(t/hm^2)。

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (4)$$

式中: C_{tot} 为该地区生态系统总的碳储量; S_i 为第 i 类土地利用面积(hm^2); n 为土地利用类型数量。

通过文献(Tang et al., 2018; 张杰等, 2018; 徐丽等, 2019; Zhu et al., 2021)获取全国和西部干旱区不同土地类型对应的碳密度数据(表 1)。由于死亡有机质碳密度在碳库中所占比重较小,且数据获取具有限制性,本文仅研究土地利用变化对生物量植被碳库和土壤碳库的影响,死亡有机质碳库暂不考虑。

2.2.2 碳密度的修正

碳密度影响因素见图 2,综合研究生物碳储量/土壤碳储量影响因素的相关文献资料,得到林分密度、水文条件对生物碳储量影响较大(石聪, 2012; 刘建泉等, 2017; 辛晓平等, 2020),土壤类型、土壤呼吸率、植被覆盖度对土壤碳储量的影响较大(黄卉, 2015; 王文俊, 2019),地形地貌对碳密度影响不大

表 1 不同土地类型的碳密度

Table 1 Carbon density of different land types

土地利用类型	t/hm ²			
	地上生物量	地下生物量	土壤有机质	死亡有机质
耕地	4.22	5.01	89.94	0
森林	44.95	13.27	126.59	0
草地	0.71	6.24	88.69	0
水体与湿地	0.93	0.66	0	0
建设用地	3.29	2.11	0	0
荒漠	0.66	1.26	45.26	0

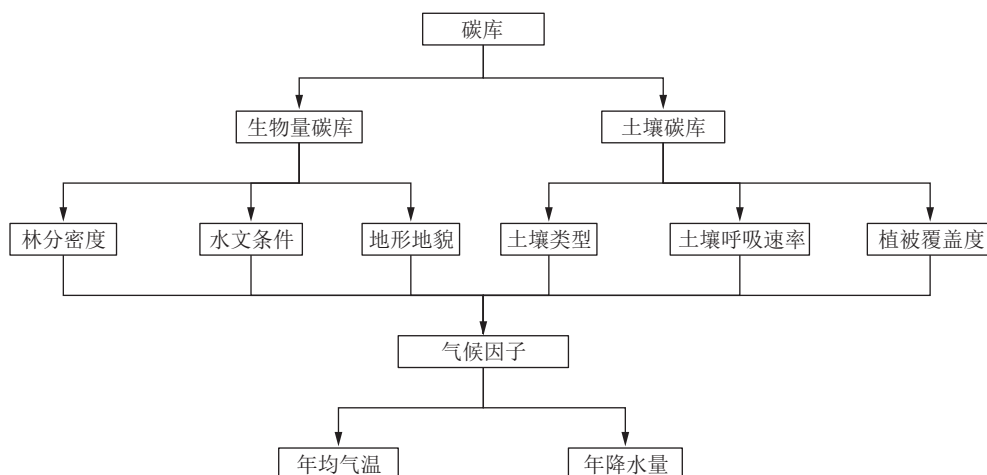


图 2 碳密度的影响因素

Fig. 2 Influencing factors of carbon density

(陈光水等, 2007)。由于林分密度、水文条件和植被覆盖度主要受气温和降水的影响(阿米娜木·艾力等, 2014), 因此, 本文结合研究区气温与降水的情况对该地区的碳密度进行修正。

Tang et al.(2018) 研究发现, 年降水量与生物碳储量和土壤碳储量存在负相关关系, 反之, 气温与生物碳储量和土壤碳储量呈正相关关系, 且该方法在干旱区被广泛应用(Zhou et al., 2020; 卢雅焱等, 2022)。具体表达式如下。

(1) 考虑降水回归模型($MAT \leq 10^{\circ}\text{C}$)

$$\begin{aligned} C_{SP} &= 79.1 + 0.07 \times MAP \\ C_{BP} &= 14.4 + 0.03 \times MAP \end{aligned} \quad (5)$$

(2) 考虑气温回归模型($MAP \leq 400 \text{ mm}$)

$$\begin{aligned} C_{ST} &= 100.5 - 5.8 \times MAT \\ C_{BT} &= 16.7 - 1.3 \times MAT \end{aligned} \quad (6)$$

考虑气温回归模型($MAP > 400 \text{ mm}$)

$$\begin{aligned} C_{ST} &= 157.7 - 3.4 \times MAT \\ C_{BT} &= 43.0 - 0.4 \times MAT \end{aligned} \quad (7)$$

式中: C_{SP} , C_{BP} , C_{ST} , C_{BT} 分别为根据年降水量进行修正的土壤碳密度 (t/hm^2)、生物量碳密度 (t/hm^2), 根据年均气温进行修正的土壤碳密度 (t/hm^2)、生物量碳密度 (t/hm^2); MAT 表示年均气温 ($^{\circ}\text{C}$); MAP 代表年均降水量 (mm)。

将西北内陆荒漠资源大区和全国的年均气温和年均降水量代入上述公式, 求解西北荒漠资源修正系数, 并计算西北内陆荒漠资源大区碳储量密度 (t/hm^2)(表 2)。

$$\begin{aligned} K_B &= \text{Average}(K_{BP}, K_{BT}) = \text{Average}\left(\frac{C'_{BP}}{C''_{BP}}, \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}}\right) \\ K_S &= \text{Average}(K_{SP}, K_{ST}) = \text{Average}\left(\frac{C'_{SP}}{C''_{SP}}, \frac{C'_{ST}}{C''_{ST}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: K_B 、 K_S 分别为生物量碳密度修正系数、土壤碳密度修正系数; K_{BP} 、 K_{BT} 分别为生物量碳密度降水因子、气温因子修正系数; K_{SP} 、 K_{ST} 分别为土壤碳密度降水因子、气温因子修正系数; C' 和 C'' 分别为西北内陆荒漠资源大区和全国的碳密度数据。

3 分析与讨论

3.1 土地利用变化

3.1.1 土地利用类型面积变化

土地利用是生态系统对人类活动的响应(Kalantaria et al., 2019), 全球范围的土地利用变化导致陆地生态系统碳储量的降低(Houghton et al., 2017), 因此研究土地利用变化意义重大。西北内陆荒漠资源大区主要土地类型为荒漠, 面积占比达该地区面积的 60% 以上, 从图 3 可知, 近 30 a 草地面积持续减少, 但始终没有低于该地区总面积的 20%, 土地类型面积的整体变化主要表现为耕地、建设用地面积显著增加, 草地显著减少。1990—2020 年, 随着建设用地面积的增加, 耕地面积增长了 $3.58 \times 10^4 \text{ km}^2$, 涨幅为 2.01%, 主要发生在准噶尔盆地温带荒漠亚区(X2)南部和塔里木盆地温带荒漠亚区(X4)北部; 草地面积减少了 $3.34 \times 10^4 \text{ km}^2$, 降幅为 1.87%, 主要发生在准噶尔盆地温带荒漠亚区(X2)南部、塔里木盆地温带荒漠亚区(X4)和南疆平原温带荒漠亚区(X6)东部。

表 2 西北内陆荒漠资源大区碳密度

Table 2 Carbon density of the northwest inland desert resource region												t/hm ²
土地类型	地上生物量碳密度				地下生物量碳密度				土壤碳密度			
	1990	2000	2010	2020	1990	2000	2010	2020	1990	2000	2010	2020
耕地	1.15	1.14	1.12	1.14	1.36	1.35	1.33	1.36	50.72	49.42	49.66	49.40
森林	12.22	12.13	11.90	12.18	3.61	3.58	3.51	3.60	71.39	69.55	69.89	69.53
草地	0.19	0.19	0.19	0.19	1.70	1.68	1.65	1.69	50.02	48.73	48.97	48.71
水体与湿地	0.25	0.25	0.25	0.25	0.18	0.18	0.17	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地	0.89	0.89	0.87	0.89	0.57	0.57	0.56	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00
荒漠	0.18	0.18	0.17	0.18	0.34	0.34	0.33	0.34	25.52	24.87	24.99	24.86

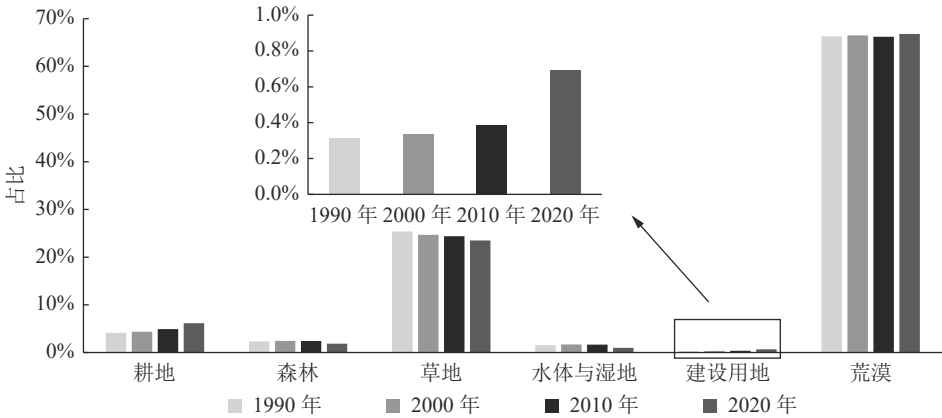


图 3 研究区近 30 a 各土地类型不同时期占比情况

Fig. 3 The proportion of different land types in different periods in recent 30 years of the study area

依据研究区近 30 a 各时期土地利用变化情况 (图 4、图 5), 分析得到近 30 a 内土地利用类型变化主要发生在 1990—2000 年与 2010—2020 年 2 个阶段, 而 2000—2010 年阶段土地面积变化并不明显。

1990—2000 年, 西北内陆荒漠资源大区土地利用类型变化主要表现为草地面积显著减少, 耕地、荒漠面积增加明显。草地面积的减少促进了周边土地利用的变化, 大面积草地转变为农田、未利用土地 (沙地等) 和建设用地。其中, 草地面积减少了 $1.27 \times 10^4 \text{ km}^2$, 降幅为 0.71%, 草地面积减少主要发生在塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4) 和阿拉善高原温带荒漠亚区 (X7) 东部; 耕地面积增长了 $0.36 \times 10^4 \text{ km}^2$, 涨幅为 0.20%, 主要在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2) 南部和阿拉善高原温带荒漠亚区 (X7) 南部发生变化。

2000—2010 年, 西北内陆荒漠资源大区的土地利用变化不明显, 这 10 a 的土地利用类型变化主要为耕地显著增加, 草地和荒漠面积减少。耕地的增

加主要受人口增长、粮食需求量变大的影响。其中, 耕地面积增长了 $1.03 \times 10^4 \text{ km}^2$, 涨幅为 0.58%, 主要发生在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2) 南部和塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4) 北部; 草地面积减少了 $0.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 降幅为 0.29%, 主要发生在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2)、伊犁盆地温带草原亚区 (X3) 和塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4); 荒漠面积减少了 $0.49 \times 10^4 \text{ km}^2$, 降幅为 0.28%, 主要发生在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2)。

2010—2020 年, 西北内陆荒漠资源大区的土地利用变化为近 30 a 变化最大的阶段, 这 10 a 间土地利用类型变化主要为耕地显著增加, 草地显著减少。其中, 耕地面积增长了 $2.19 \times 10^4 \text{ km}^2$, 涨幅为 1.23%, 主要发生在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2) 和塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4); 草地面积减少了 $1.54 \times 10^4 \text{ km}^2$, 降幅为 0.86%, 主要发生在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2)、伊犁盆地温带草原亚区 (X3)、塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4) 和南疆平原温带荒漠

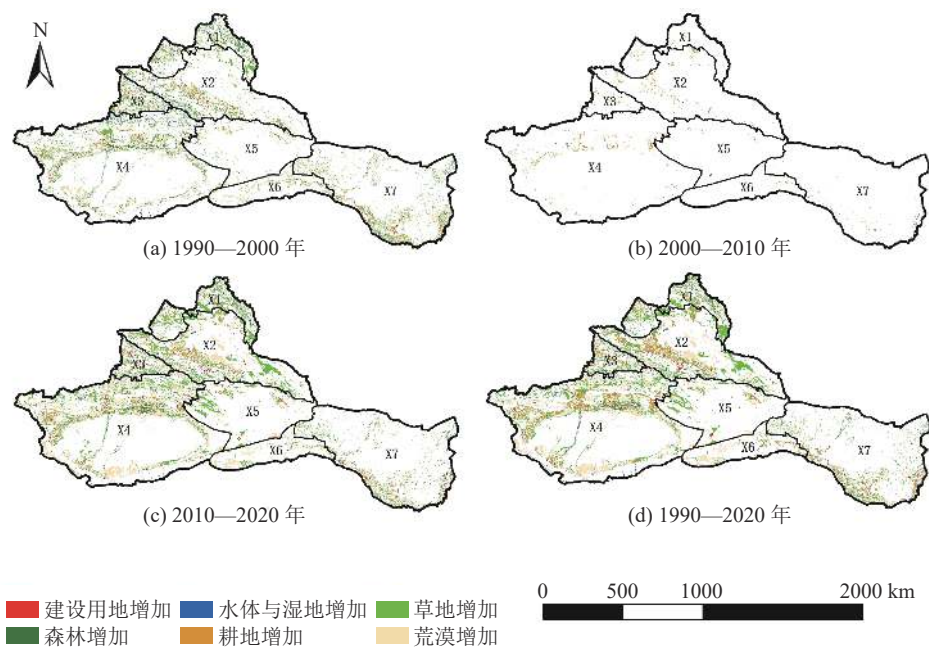


图 4 研究区近 30 a 各时期土地利用类型增加情况(区划类型 X1~X7 含义同图 1)

Fig. 4 The increase of land use types in different periods in recent 30 years of the study area

亚区 (X6) 西部;随着耕地面积的增加,建设用地面积也发生一定的增长,主要集中在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2) 和塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4)。这些变化主要是由于该阶段的经济的发展促进了建设用地面积的增长和人类对粮食的需求量增加。

3.1.2 土地利用转移

在了解研究区土地利用类型面积变化后,掌握土地类型面积的转入与转出利于分析各土地利用类型变化的原因。1990—2020 年,约有 $10.34\times10^4\text{ km}^2$ 的土地发生转移,其中耕地为主要的转入者,净转入量为 $3.58\times10^4\text{ km}^2$,这期间主要由于荒漠开发、草地

开荒导致草地和荒漠的大量转出,耕地面积增长较快;草地和荒漠所占面积较大,是该时期的主要转出者,由于草地被耕地大量占用、荒漠不断开垦为耕地,以及人口的不断增长对木材及粮食需求量的增加,草地、荒漠转出为耕地和建设用地(表 3)。综上所述可知,耕地与草地、荒漠、建设用地的转化为研究区土地利用的主要特征。近 30 a 主要土地类型转移分布图(图 6)显示,2010—2020 年的土地类型转变较多,而 2000—2010 年,土地利用转化相对较少。近 10 a 以草地转出荒漠为主,转出面积约 $13.33\times10^4\text{ km}^2$,占草地转出面积的 69.02%,主要分布在准噶尔盆地

表 3 1990—2020 年西北内陆荒漠资源大区土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix of the northwest inland desert resource region from 1990 to 2020

土地类型	转移面积/km ²						1990年面积/km ²
	草地	耕地	荒漠	建设用地	森林	水体与湿地	
草地	294900.47	32045.29	103545.79	2343.19	15782.08	3503.37	452120.19
耕地	8914.81	55082.84	2626.27	4618.32	1454.18	1042.61	73739.02
荒漠	86651.42	15592.15	1069950.29	3232.06	2660.10	3804.09	1181890.10
建设用地	457.78	2720.58	474.95	1733.45	109.90	79.37	5576.03
森林	21618.14	2949.27	3468.69	248.60	12595.60	562.96	41443.25
水体与湿地	6223.33	1197.67	10896.87	161.85	389.08	8735.54	27604.33
2020年面积/km ²	418765.95	109587.80	1190962.86	12337.46	32990.93	17727.93	1782372.92

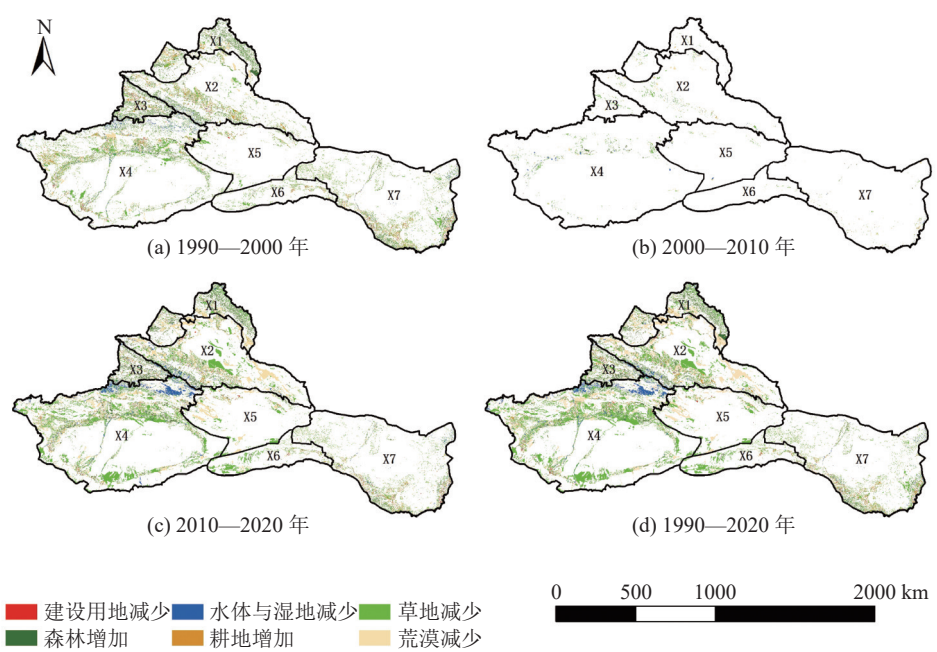


图 5 研究区近 30 a 各时期土地利用类型减少情况 (区划类型 X1~X7 含义同图 1)
Fig. 5 The decrease of land use types in different periods in recent 30 years of the study area

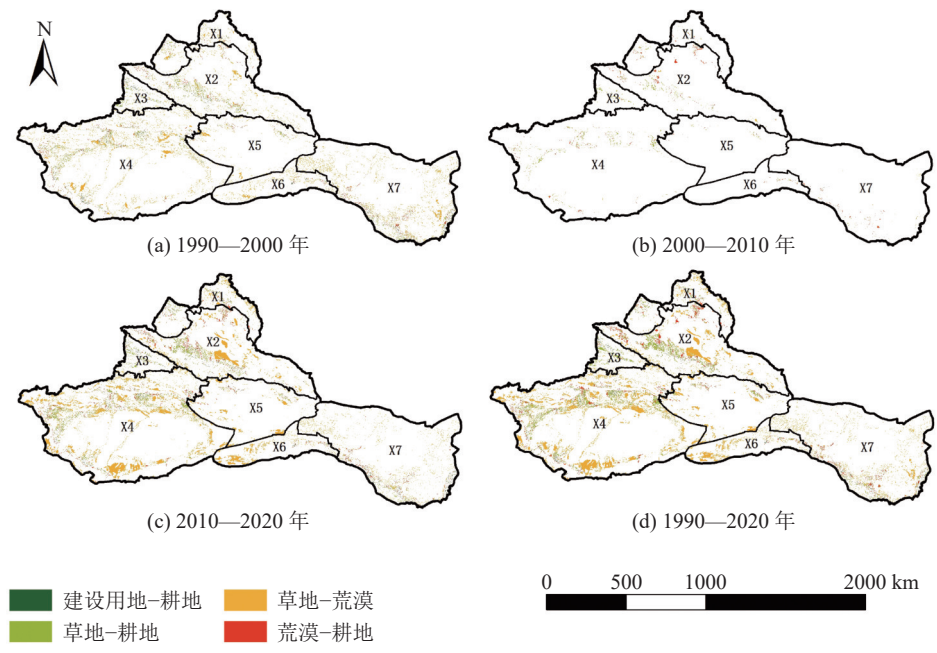


图 6 研究区近 30 a 主要土地类型转移情况 (区划类型 X1~X7 含义同图 1)
Fig. 6 The main land type transfer in recent 30 years of the study area

温带荒漠亚区 (X2) 和塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4); 1990—2000 年也以草地转出荒漠为主, 转出面积约 $5.30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占草地转出面积的 57.24%, 散乱地分布在西北内陆荒漠资源大区的中部和东部, 该类型的转化主要是由于草地退化引起的, 而草地退化是一个复杂的过程, 受自然因素和人类不合理放

牧的影响。干旱少雨、生态条件脆弱是草地退化和草地生态恶化的主要原因, 除粮食和放牧的消耗外, 长期的草地退耕和一些不合理的管理制度也是草地退化的主要原因。

以土地利用动态来衡量该地区的土地利用类型转变强度。①各土地类型强度(图 7): 1990—

2020 年, 研究区土地利用类型变化呈现出建设用地>耕地>水体与湿地>森林>草地>荒漠, 且近 30 a 各地类的动态度最大值都出现在 2010—2020 年。

②各二级区强度(图 8): 从 30 a 内各二级亚区的综合动态度看, 塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4) 综合动态度最大, 其次为南疆平原温带荒漠亚区 (X6)、阿尔泰山与塔城盆地温带草原亚区 (X1)、伊犁盆地温带草原亚区 (X3), 综合动态度均超过 0.05, 准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2) 和吐鲁番盆地温带荒漠亚区 (X5) 的综合动态度分别为 0.043、0.041, 阿拉善高原温带荒漠亚区 (X7) 综合动态度小于 0.04。2010—2020 年, 除阿拉善高原温带荒漠亚区 (X7) 综合动态度为

0.097 外, 其他各二级亚区的综合动态度均超过 0.1, 结果表明在该阶段内土地利用转化较剧烈。

3.2 碳储量变化

3.2.1 总碳储量变化

以西北内陆荒漠资源大区的土地利用类型及碳密度表为数据基础, 通过 InVEST 模型计算得到研究区 4 个时期的碳储量值。30 a 间, 西北内陆荒漠资源大区碳储量呈波动下降趋势, 碳储量净减少 1.86×10^8 t。2000 年与 2020 年研究区的固碳潜力呈下降趋势, 碳储量分别减少 1.72×10^8 t、 0.46×10^8 t; 2000—2010 年固碳潜力有所增加, 碳储量增加了 0.31×10^8 t。

运用 ArcGIS 对 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 4 个时期的碳储量空间分布进行分析, 以等间距方法将碳储存能力划分为 5 个等级(即碳储量 < 1750 t/km² 为低等级; 1750 t/km² $\leq$ 碳储量 < 3450 t/km² 为中低等级; 3450 t/km² $\leq$ 碳储量 < 5150 t/km² 为中等等级; 5150 t/km² $\leq$ 碳储量 < 6850 t/km² 为中高等级; 碳储量 ≥ 6850 t/km² 为高等级)。根据图 9 可知, 该大区 4 个时期的碳储量空间格局均以中低等级为主, 中低等级主要分布在准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2) 北部、塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4)、吐鲁番盆地温带荒漠亚区 (X5)、南疆平原温带荒漠亚区 (X6) 和阿拉善高原温带荒漠亚区 (X7)。该大区 4 个时期在阿尔泰山与塔城盆地温带草原亚区 (X1)、准噶尔盆地温带荒漠亚区 (X2) 南部、伊犁盆地温带草原亚区 (X3) 和塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4) 北部地区碳储量相对较高, 以中等级及中高等级碳储量分布为主; 而碳储量低等级区主要分布在 1990 年、2000 年和 2010 年的塔里木盆地温带荒漠亚区 (X4) 东北部, 但在 2020 年该区域由于草地的转入碳储量有所提升。

3.2.2 土地利用变化引起的碳储量变化

根据近 30 a 西北内陆荒漠资源大区土地转移情况及各类土地的生物碳密度与土壤碳密度, 研究土地利用变化对碳储量变化的影响。由于土地类型相互转化种类较多, 因此只对土地类型转化较明显的 4 类展开分析(即草地转化为荒漠、草地转化为耕地、荒漠转化为耕地、建设用地转化为耕地)(表 4)。1990—2000 年草地退化成荒漠导致该阶段总碳储量的减少, 其中以土壤碳储量为主; 2000—2010 年荒漠

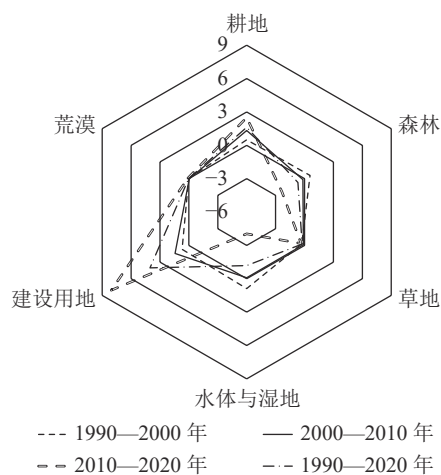


图 7 西北内陆荒漠资源大区土地利用类型动态度

Fig. 7 Dynamic attitudes of land use types in northwest inland desert resource region

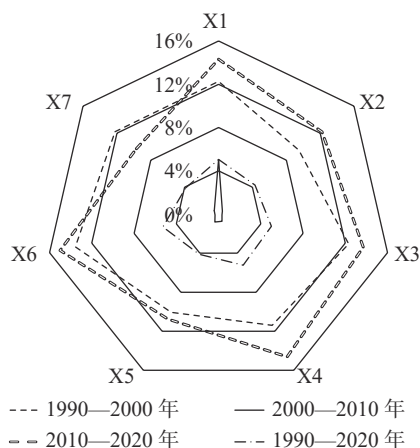


图 8 西北内陆荒漠资源大区二级亚区土地利用动态度
(区划类型 X1~X7 含义同图 1)

Fig. 8 Dynamic attitudes of land use in two sub-regions of northwest inland desert resource region

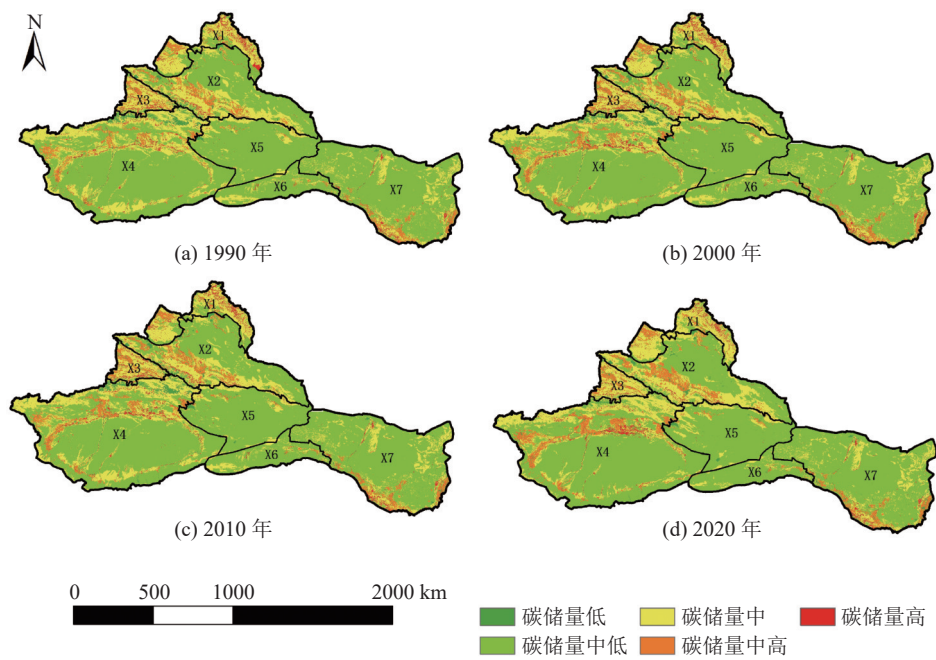


图 9 1990—2020 年西北内陆荒漠资源大区碳储量空间分布 (区划类型 X1~X7 含义同图 1)

Fig. 9 Spatial distribution of carbon storage in desert resource regions of Northwest China from 1990 to 2020

表 4 近 30 a 西北内陆荒漠大区主要土地类型转变下的碳储量变化

Table 4 Carbon storage changes under the change of main land types in the inland desert region of Northwest China in recent 30 years

阶 段	土地类型转化	面积/km ²	生物碳储量变化/10 ⁴ t	土壤碳储量变化/10 ⁴ t	总碳储量变化/10 ⁴ t
1990—2000年	草地—耕地	15248.65	91.49	−91.49	0
	草地—荒漠	53042.32	−726.68	−13340.14	−14066.82
	建设用地—耕地	2748.80	28.31	1358.46	1386.77
	荒漠—耕地	6105.24	120.27	1459.15	1579.42
2000—2010年	草地—耕地	6576.00	38.14	61.56	99.70
	草地—荒漠	601.00	−8.23	−142.68	−150.91
	建设用地—耕地	17.00	0.17	8.44	8.61
	荒漠—耕地	3859.00	74.48	956.65	1031.13
2010—2020年	草地—耕地	21994.25	145.16	94.58	239.74
	草地—荒漠	92004.14	−1214.45	−22182.20	−23396.65
	建设用地—耕地	2755.13	29.48	1361.03	1390.51
	荒漠—耕地	11044.82	220.90	2696.04	2916.94

转化为耕地促使该阶段总碳储量增加,其中以土壤碳储量为主;2010—2020 年草地转化为荒漠导致该阶段总碳储量减少,其中以土壤碳储量为主。

运用栅格计算器获取 30 a 内碳储量空间变化分布图(图 10),并按照总变化量的 5%、50% 作为断点,将西北内陆荒漠资源大区的碳储量变化划分为 5 个等级,即:基本不变、一般增加、一般减少、显著

增加和显著减少。其中,碳储量变化范围在 424.4 t 内的定义为基本不变;碳储量变化范围在 424.4~4244 t 之间的为一般变化;碳储量变化范围超过 4244 t 为显著变化。1990—2020 年,研究区碳储量变化以一般减少和一般增加为主,其中,准噶尔盆地温带荒漠亚区(X2)南部散落区域碳储量显著减少,主要是随西北地区社会经济的发展,建设用地面积

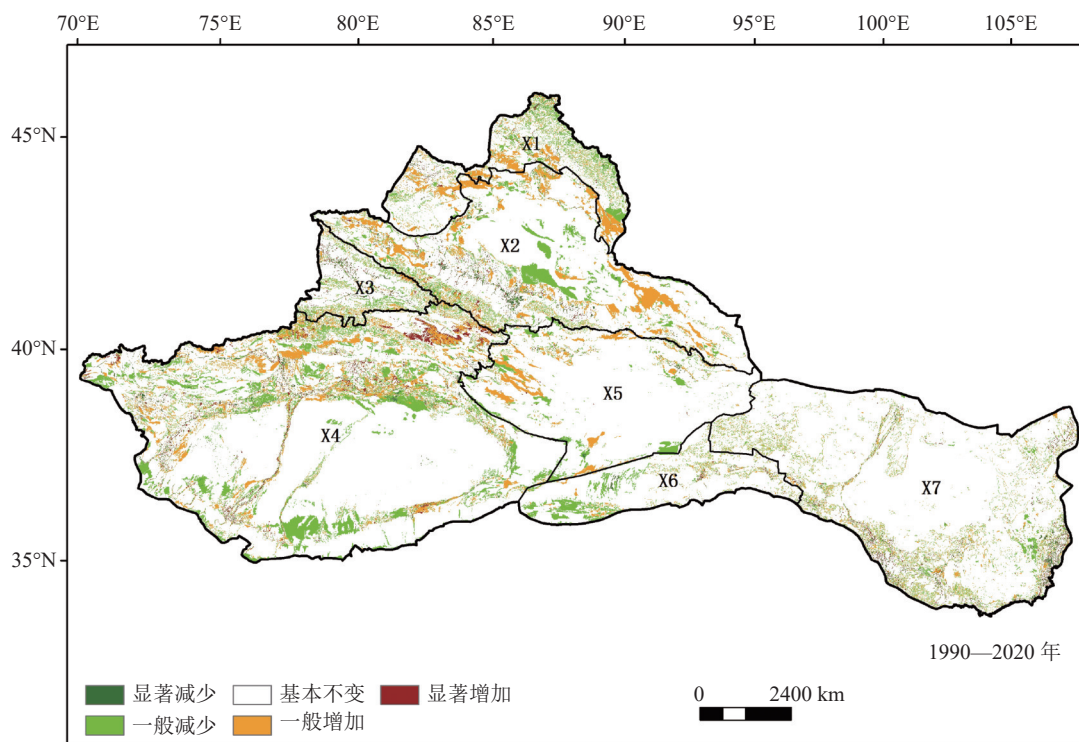


图 10 1990—2020 年西北内陆荒漠资源大区不同时期碳储量变化

Fig. 10 Changes of carbon storage in different periods of desert resource regions in Northwest China from 1990 to 2020

增加导致的;塔里木盆地温带荒漠亚区(X4)北部存在碳储量显著增加,主要是因为荒漠地区的开发使草地转入引起的。

4 结 论

本文基于土地利用数据及修正后的生物碳储量密度与土壤碳储量密度,研究近 30 a 西北内陆荒漠资源大区土地利用类型的变化和转移情况对碳储量的影响。研究区 1990—2020 年大量草地面积转为荒漠导致总碳储量损失,尤其是在全球气候变暖情况下,研究区气温上升、降水减少、持续的干旱导致草原生物灾害的频繁发生,区内过度放牧使草地遭到破坏,研究结果与前人研究一致。西北内陆荒漠资源大区土地利用类型及碳储量变化情况导致碳储量变化的分析如下。

(1)1990—2020 年,西北内陆荒漠资源大区的耕地和草地面积变化较显著,转移类型主要为草地转为荒漠、草地转为耕地、荒漠转为耕地及建设用地转为耕地,其中近 10 a 的土地类型变化占主要部分。

(2)近 30 a 西北内陆荒漠资源大区的生态系统碳储量主要集中于阿尔泰山与塔城盆地温带草原亚

区(X1)、准噶尔盆地温带荒漠亚区(X2)南部、伊犁盆地温带草原亚区(X3)和塔里木盆地温带荒漠亚区(X4)北部地区。

(3)1990—2020 年,西北内陆荒漠资源大区生态系统碳储量的减少,说明草地退化、耕地扩张,虽然促进了经济的快速发展,但也导致该地区固碳能力逐渐减弱,不利于生态环境的可持续发展。

参考文献

- Houghton R A, Nassikas A A. 2017. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850—2015[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 3(31): 456–472.
- Kalantaria Z, Ferreirab C S S, Pagea J, et al. 2019. Meeting sustainable development challenges in growing cities: Coupled social–ecological systems modeling of land use and water changes[J]. *Journal of Environmental Management*, 1(245): 471–480.
- Liu G, Wei M, Yang Z, et al. 2023. Relationship between spatio-temporal evolution of soil pH and geological environment/surface cover in the eastern Nenjiang River Basin of Northeast China during the past 30 years[J]. *China Geology*, 6(3): 369–382.
- Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global Satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4): 811–841.
- Tang X, Zhao X, Bai Y, et al. 2018. Carbon pools in China's terrestrial

- ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 16(115): 4021–4026.
- Zhou J, Zhao Y, Huang P, et al. 2020. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China[J]. Ecological Indicators, (118): 106803.
- Zhu G, Qiu D, Zhang Z, et al. 2021. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. Ecological Indicators, (127): 107770.
- 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等. 2014. 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素[J]. 生态学报, 34(7): 1626–1634.
- 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 2007. 森林地下碳分配 (TBCA) 研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, (1): 34–42.
- 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 等. 2023. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估[J]. 环境科学, 44(8): 4655–4665.
- 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 2011. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学, 33(10): 1932–1939.
- 冯益明, 姚爱冬, 姜丽娜. 2014. CASA 模型的改进及在干旱区生态系统 NPP 估算中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 28(8): 39–43.
- 高扬, 何念鹏, 汪亚峰. 2013. 生态系统固碳特征及其研究进展[J]. 自然资源学报, 28(7): 1264–1274.
- 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 2008. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J]. 中国科学 (D 辑), (2): 197–210.
- 黄卉. 2015. 基于 InVEST 模型的土地利用变化与碳储量研究[D]. 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文.
- 黄莉, 刘晓煌, 刘玖芬, 等. 2021. 长时间尺度下自然资源动态综合区划理论与实践研究——以青藏高原为例[J]. 中国地质调查, 8(2): 109–117.
- 赖明, 吴淑玉, 张海燕, 等. 2021. 基于综合区划的中国西南地区自然资源动态变化特征分析[J]. 中国地质调查, 8(2): 83–91.
- 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 2019. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例[J]. 生态学报, 39(5): 1616–1626.
- 李勇, 高岚. 2021. 中国“碳中和”目标的实现路径与模式选择[J]. 华南农业大学学报 (社会科学版), 20(5): 77–93.
- 廖艳, 崔军, 杨忠芳, 等. 2012. 三江平原典型土地利用类型土壤呼吸强度对温度的敏感性[J]. 地质通报, 31(1): 164–171.
- 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 2000. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, (5): 733–740.
- 刘海霞, 马立志. 2016. 西北地区生态环境问题及其治理路径[J]. 实事求是, (4): 50–54.
- 刘建泉, 李进军, 郝虎, 等. 2017. 祁连山青海云杉林生物量与碳储量及其影响因素分析[J]. 现代农业科技, (12): 140–143.
- 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 2019. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. 热带地理, 39(3): 397–409.
- 柳梅英, 包安明, 陈曦, 等. 2010. 近 30 年玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对植被碳储量的影响[J]. 自然资源学报, 25(6): 926–938.
- 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 2022. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 39(6): 1896–1906.
- 马晓哲, 王铮. 2015. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. 生态学报, 35(17): 5898–5907.
- 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 2011. 土地利用变化对碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 21(10): 76–83.
- 石聪. 2012. 徐州侧柏人工林生态系统碳储量影响因素研究[D]. 南京林业大学硕士学位论文.
- 宋佳颖. 2021. 西北五省植被 NDVI 的时空变化及驱动力研究[D]. 西北师范大学硕士学位论文.
- 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 2000. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, (5): 533–544.
- 王文俊. 2019. 福建省土壤有机碳储量估算、时空分布特征及其影响因素[J]. 现代地质, 33(6): 1295–1305.
- 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 2001. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, (1): 13–16.
- 王秀兰, 包玉海. 1999. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, (1): 83–89.
- 谢立军, 白中科, 杨博宇, 等. 2023. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J]. 地学前缘, 30(2): 447–462.
- 辛晓平, 丁蕾, 程伟, 等. 2020. 北方草地及农牧交错区草地植被碳储量及其影响因素[J]. 中国农业科学, 53(13): 2757–2768.
- 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2019. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 4(1): 90–96.
- 杨园园, 戴尔阜, 付华. 2012. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架[J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 33(3): 41–47.
- 翟羽娟, 张艳红, 姜琦刚, 等. 2022. 吉林省西部农牧交错区“三生空间”时空演变[J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 52(3): 1016–1026.
- 张楚强, 向洋, 方婷, 等. 2022. LUCC 影响下太原市生态系统碳储量时空变化及预测[J]. 安全与环境工程, 29(6): 248–258.
- 张峰, 周广胜, 王玉辉. 2008. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. 植物生态学报, (4): 786–797.
- 张海燕, 樊江文, 黄麟, 等. 2020. 中国自然资源综合区划理论研究与技术方案[J]. 资源科学, 42(10): 1870–1882.
- 张杰, 李敏, 敖子强, 等. 2018. 中国西部干旱区土壤有机碳储量估算[J]. 干旱区资源与环境, 32(9): 132–137.
- 张子凡, 张海燕, 刘晓煌, 等. 2021. 华北地区自然资源综合区划的动态变化特征[J]. 中国地质调查, 8(2): 92–99.
- 郑艺文, 张海燕, 刘晓洁, 等. 2021. 1990—2018 年东北地区综合区划下自然资源动态变化特征分析[J]. 中国地质调查, 8(2): 100–108.
- 周涛, 史培军. 2006. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响[J]. 地球科学进展, (2): 138–143.