

西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及 碳源/汇变化模拟与预估

韩 敏, 徐长春, 隆云霞, 刘 芳

(新疆大学 地理科学学院, 新疆绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘 要: [目的] 研究中国西北干旱区 2000—2020 年以及未来 2100 年不同发展情景下的土地利用变化, 分析土地利用变化引起的碳储量、碳源/汇变化, 以期为区域土地优化管理及碳汇增加和环境保护提供参考。[方法] 基于 2000—2020 年土地利用数据, 采用 FLUS 模型模拟未来 2100 年土地利用情景; 采用修正后的碳密度、土地利用数据, 运用 InVEST 模型 carbon 子模块估算并分析 2000—2020 年及未来 2100 年不同土地利用情景下的区域生态系统碳储量、碳源/汇及变化。[结果] ① 2000—2020 年西北干旱区耕地、草地和建设用地面积持续增加, 林地、水域和未利用地面积减少, 21 a 间全区域碳储量增长了 1.60×10^8 t, 其中植被碳储总量增加 2.89×10^5 t, 土壤碳储总量增加 1.60×10^8 t。② 与 2020 年相比, 2100 年自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景下碳储量分别增加了 6.37×10^8 , 7.78×10^8 , 8.49×10^8 t, 耕地、生态保护情景下碳储能力有明显的提升, 是增加区域碳汇的重要途径。③ 西北干旱区碳储量值空间分布存在明显异质性, 碳储量高值区 (9 800~14 568 t) 主要集中连片分布于山林区, 而广大沙漠、戈壁区碳储量值较低 (1 600~5 800 t), 这与区域土地利用类型的分布密切相关。④ 2000—2100 年碳源/汇区呈嵌套、交错分布, 碳源区主要分布于天山北坡、塔里木盆地绿洲边缘及昆仑山西部, 碳汇区与碳储量中、高值区分布基本一致, 集中在林地、草地广布的山区。[结论] 西北干旱区 2000—2020 年碳储量呈持续上升趋势, 未来 3 种情景下碳储量也均有明显增加, 特别是生态保护情景下碳储能力显著提升, 有利于生态环境持续良性发展。

关键词: 西北干旱区; 土地利用变化; 碳储量; 碳源/汇

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0335-10

中图分类号: F301.24, X171.1

文献参数: 韩敏, 徐长春, 隆云霞, 等. 西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及碳源/汇变化模拟与预估[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 335-344. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.042; Han Min, Xu Changchun, Long Yunxia, et al. Simulation and prediction of changes in carbon storage and carbon source/sink under different land use scenarios in arid region of Northwest China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 335-344.

Simulation and Prediction of Changes in Carbon Storage and Carbon Source/Sink Under Different Land Use Scenarios in Arid Region of Northwest China

Han Min, Xu Changchun, Long Yunxia, Liu Fang

(Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, College of

Geographical Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830017, China)

Abstract: [Objective] The land-use changes from 2000 to 2020 and in the future (2100) under different development scenarios in the arid region of Northwest China were studied, and the changes in carbon storage and carbon source/sink caused by land-use changes were analyzed, in order to provide a reference for regional land management optimization, carbon sink increase, and environmental protection. [Methods] Based on land use data from 2000 to 2020, the FLUS model was used to simulate the land use situation in 2100. The carbon storage, carbon source/sink, and carbon changes in regional ecosystems in 2000—2020 and in 2100

收稿日期: 2022-03-01

修回日期: 2022-04-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“变化环境下中亚干旱区气候干湿变化及预估”(42067062)

第一作者: 韩敏(1996—), 女(汉族), 甘肃省临夏市人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区生态水文与气候变化。Email: hm_8799@163.com。

通信作者: 徐长春(1977—), 女(汉族), 江苏省赣榆县人, 教授, 博士, 主要从事干旱区气候、水文与水资源研究。Email: xcc0110@163.com。

under different development scenarios were estimated and analyzed by using the carbon submodule of the InVEST model with the revised carbon density and land use data. [Results] ① From 2000 to 2020, the area of cultivated land, grassland, and construction land increased continuously, while the areas of forest land, water, and unused land decreased. The total carbon storage of the region increased by 1.60×10^8 t during the 21 years, including 2.89×10^5 t for vegetation and 1.60×10^8 t for soil. ② Compared with 2020, carbon storage will increase by 6.37×10^8 , 7.78×10^8 t, and 8.49×10^8 t, respectively, under the natural development scenario, the cultivated land protection scenario, and the ecological protection scenario in 2100. The carbon storage capacity of the cultivated land protection scenario and the ecological protection scenario will improve significantly, and these will be important ways to increase regional carbon sink. ③ There was obvious heterogeneity in the spatial distribution of carbon storage values in Northwest China. The high-value areas of carbon storage (9 800~14 568 t) were mainly located in mountainous forest areas, while the vast desert and Gobi areas had low carbon storage values (1 600~5 800 t), and the distribution of carbon was closely related to the distribution of regional land use types. ④ From 2000 to 2100, the carbon source/sink area was nested and interlaced. The carbon source area was mainly located over the northern slope of the Tianshan Mountains, the oasis edge of the Tarim Basin, and the Western Kunlun Mountains. The distribution of the carbon sink area was basically consistent with the middle and high value areas of carbon reserves, and concentrated on the mountainous area containing extensive forest land and grassland. [Conclusion] The carbon storage in the arid area of Northwest China showed a continuous upward trend from 2000 to 2020, and the carbon storage in the future under the three scenarios also increased significantly, especially under the ecological protection scenario, which is conducive to the sustainable and benign development of the ecological environment

Keywords: the northwest arid region; land use change; carbon storage; carbon source and sink

21 世纪以来,全球范围内的工业污染物排放量一直居高不下,2017 年中国碳排放量已占全球总排放量的 27%,如何减少碳排放,早日实现“碳达峰、碳中和”的“双碳”目标日渐成为国际关注的焦点与学术界研究的热点。据相关研究,土地利用变化引起的碳排放量约占全球总碳排放的三分之一^[1-2],生态系统结构功能变化正在深刻影响着全球碳循环过程,林地、耕地、草地等土地利用方式的转变促使植被覆盖改变,进而引起自然界碳存储及碳源/汇变化^[3-4]。因此,正确认识土地利用变化下的碳储量时空分布、碳源/汇变化,对于区域自然资源管理、经济发展和土地利用决策具有重要的指导意义和参考价值^[5]。为此,众多学者对碳储量及碳源/汇开展了相关研究,Zhang 等^[6]、Bu 等^[7]对某一植被类型或者城市土地覆被的碳源/汇进行了模拟分析;Yang 等^[8]、Liang 等^[9]针对不同土地利用变化下的碳储量进行了模拟,并评估了碳储量变化对生态环境的影响;杨洁等^[10]、史名杰等^[11]评估了不同土地利用情景下的碳储量变化。目前,针对区域碳储量变化或某一植被类型、土地利用类型碳源/汇变化的研究较多,但对多种土地利用类型及其在不同情景下的碳储量、碳源/汇变化评估的研究还相对较少。因此,关注土地利用变化基

础上的碳储量及碳源/汇就显得极为必要,它可为优化生态系统服务价值及提高碳存储能力提供指导,为区域持续协调发展提供方向和路径。

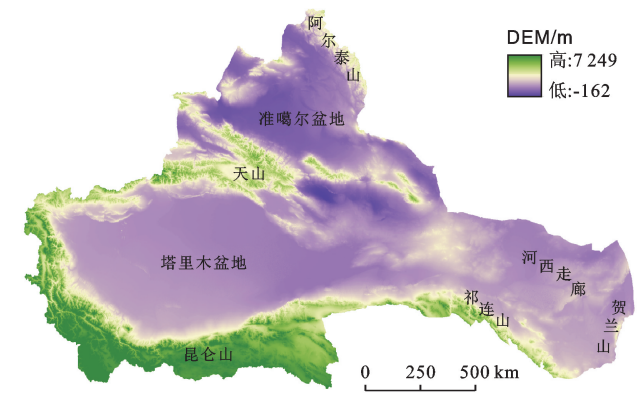
西北干旱区作为“一带一路”核心区和中国重要的能源战略基地,随着社会经济的发展,城市建设用地不断扩张,人为干预下的林地、草地变更为耕地导致了大气中 CO_2 浓度显著上升^[12],既不利于当地经济发展,也不利于全球气候变暖的减缓和节能减排措施的实施。因此,开展该区域土地利用变化对碳储量、碳源/汇的影响研究十分重要且必要。

鉴于此,本文以中国西北干旱区为例,采用 7 期土地利用数据,分析了 2000—2020 年该区的土地利用变化状况,运用 FLUS 模型预测了该区 2100 年在自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景下的土地利用状况;利用 InVEST 模型对 2000—2020 年和 2100 年的碳储量、碳源/汇进行了模拟;分析了 2000—2020 年和 2100 年土地利用变化对碳储量、碳源/汇的影响,以期为该区未来土地发展规划和“双碳”目标达成提供决策参考依据。

1 研究区概况

西北干旱区地处亚欧大陆腹心、中国西北内陆,

其地理范围 73° — 107° E 和 35° — 50° N, 面积 $2.35 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占全国总面积的 24.5%^[13]。其行政区划自西向东主要包括新疆维吾尔自治区全部、甘肃河西走廊地区及内蒙古西北部地区。区域内生态系统类型多样, 包括山地、绿洲、荒漠及尾间湖生态系统^[14]; 地理地貌单元复杂, 海拔高度为 $-162 \sim 7\,249 \text{ m}$, 主要以山脉、盆地、沙漠为主, 其中山脉包括阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山、贺兰山; 盆地包括准噶尔盆地、塔里木盆地; 沙漠包括古尔班通古特沙漠、塔克拉玛干沙漠、库姆塔格沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠。该区域深居内陆, 距海遥远, 且受山脉阻隔水汽难以到达, 属于典型的温带大陆型气候, 大部分区域年均降水不足 200 mm, 气候干燥, 植被覆盖率低, 自然条件恶劣(图 1)。



注: 基于审图号 GS(2020)4632 号底图制作, 底图来自于自然资源部标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>)。

图 1 西北干旱区地形图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

(1) 土地利用数据。来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/data>), 包括 7 期原始分辨率为 30 m 的中国土地利用数据(2000, 2005, 2008, 2010, 2015, 2018, 2020 年), 将其重采样至 1 km, 并重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 种类型, 主要用于土地利用变化分析及土地利用变化下的碳储量模拟。

(2) 驱动因子数据。本研究中的驱动因子数据包括人口密度(POP)、国内生产总值(GDP)、气温、降水、数字高程模型(DEM)、坡度、坡向、公路、铁路、高速、河流、湖泊和城镇。人口密度、国内生产总值、气温、降水数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/data>), DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>), 坡度、坡向数据在 ArcGIS 10.6 中用 DEM 数据

经表面分析得到, 分辨率为 1 km。驱动因子数据主要用来分析各类因子变化对土地利用变化的影响。

(3) 道路数据。来源于 Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org>), 河流、湖泊和城镇数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/data>), 经投影、裁剪、统一行列数, 处理成 FLUS 模型输入数据, 用于分析道路变化对土地利用变化的影响。

(4) 气象数据。本研究所用的气象数据主要包括年均温和年均降水, 来源于中国地面气候资料日值数据集(v3.0), 该数据包括 824 个国家级地面气象观测站站点数据, 经 Anusplin 插值法插值成分辨率为 1 km 的格点数据, 裁剪获得本研究区相应数据用于碳密度修正。

2.2 研究方法

2.2.1 FLUS 模型 FLUS 模型全称 GeoSOS-FLUS 模型, 由中山大学黎夏团队开发^[15], 是一个用于模拟、预测土地利用变化的模型。该模型以 GeoSOS 模型为基础, 在元胞自动机的基础上, 结合人工神经网络算法和轮盘选择机制改进升级获得。与其他土地利用模型相比, 该模型充分考虑了区域内土地利用变化的自然、人为驱动力因子的作用, 极大地提高了土地利用变化格局精度, 使模拟变化无限接近实际变化。

2.2.2 InVEST 模型 InVEST 模型由美国自然资源项目组开发, 主要用于评估生态系统服务功能及经济价值, 可为生态系统管理提供决策服务^[16]。模型主要包括陆地、淡水和海洋三大生态系统服务评估模块^[17], 本文基于碳密度和土地利用数据, 使用陆地生态系统碳储量量子模块, 估算土地利用变化下的碳储量及碳源/汇。

2.3 碳储量估算

2.3.1 碳储量值的估算 InVEST 模型可模拟不同土地利用类型及未来土地发展情景下的生态系统碳储量及碳源/汇变化。该模型通过碳库代替法模拟碳储量, 即采用土地利用类型地上、地下、土壤、死亡凋落物碳密度数据, 用对应面积乘以碳密度数据的形式, 分别计算各碳库储量数据, 经相加得到某一地区生态系统碳储总量。其计算公式为:

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

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

注: C_i 为土地利用类型; $C_{i-\text{above}}$ 为土地利用类型 i 的地上碳密度(t/hm^2); $C_{i-\text{below}}$ 为土地利用类型 i 的地

下生物量碳密度(t/hm^2); C_{i-soil} 为土地利用类型 i 的土壤碳密度(t/hm^2); C_{i-dead} 为土地利用类型 i 的死亡凋落物碳密度(t/hm^2); C_{i-all} 为生态系统中的碳储量(t); S_i 为土地利用类型 i 的面积(km^2); n 为土地利用类型的数量(本研究区 n 为 6)。

2.3.2 碳密度值的选定及修正 根据李克让等^[18]、解宪平等^[19]、朱超等^[20]、张杰等^[21]、柳梅英等^[22] 的相关研究,得到全国 6 种土地利用类型碳密度,运用 Alam 等^[23]、陈光水等^[24] 提出的气象因子修正公式对碳密度进行修正,由于死亡凋落物碳库在总碳库中占比微小且数据难以获得,故设其为 0。修正公式如下:

$$C_{SP}=3.396\ 8\times MAP+3\ 996.1$$

(3)

$$C_{BP}=6.789\times e^{0.005\ 4\times MAP}$$

(4)

$$C_{BT}=28\times MAT+398$$

(5)

注: C_{SP} 表示年均降水量修正后的土壤碳密度(t/hm^2); C_{BP} 表示年均降水修正后的生物量碳密度(t/hm^2); C_{BT} 表示年均温修正后的生物量碳密度(t/hm^2); MAP 表示年均降水量(mm); MAT 表示年均温($^{\circ}C$)。

$$K_{BP}=\frac{C_{1BP}}{C_{2BP}}$$

(6)

$$K_B=K_{BP}\times K_{BT}$$

(7)

$$K_S=\frac{C_{1SP}}{C_{2SP}}$$

(8)

注: K_{BP} 表示年均降水因子修正的生物量碳密度系数; K_{BT} 表示年均温因子修正的生物量碳密度系数; K_B 表示生物量碳密度修正系数; K_S 表示土壤碳密度修正系数; C_1 和 C_2 表示研究区及全国的相关数据。

精准的碳密度数据是碳储量模拟的关键,选择适合本研究区的碳密度数据尤为重要。在没有本地实测碳密度数据的情况下,选择前人研究的其他区域实

测的碳密度数据,采用本地气象因子加以修正,以获得适合本研究区的碳密度数据(表 1)。

表 1 西北干旱区不同土地利用类型的碳密度 t/hm^2

类 型	$C_{i-above}$	$C_{i-below}$	C_{i-soil}	C_{i-dead}
耕 地	0.43	1.95	80.22	0
林 地	5.34	3.22	137.12	0
草 地	2.20	1.38	73.93	0
水 域	0.01	0	0	0
建设用地	0.02	0	57.72	0
未利用地	0	0.65	15.99	0

注: $C_{i-above}$ 地上生物量碳密度; $C_{i-below}$ 地下生物量碳密度; C_{i-soil} 土壤碳密度; C_{i-dead} 死亡凋落物碳密度。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 2000—2020 年土地利用变化 由表 2 可知,2000—2020 年西北干旱区的土地利用类型主要以未利用地、草地、耕地为主,面积比例分别为 57.70%,18.55%,2.91%;建设用地面积极少,仅占 0.94%,这与西北干旱区人口密度低、城市化水平程度低有关;耕地、草地、建设用地呈增长状态,面积分别占总转移用地的 11.46%,42.48%,2.15%;林地、水域、未利用地面积均呈下降态势,面积分别减少了 0.22%,55%,0.77%。

从土地利用类型之间的转移情况(图 2)来看,各土地利用类型均在相互转化,21 a 间发生转移的面积 为 $3.92\times 10^5\ km^2$ 。耕地转入面积为 $4.49\times 10^4\ km^2$,约为转出面积的 3.68 倍,是其他土地利用类型的接受者;草地、建设用地转入面积均大于转出面积,转入面积分别为转出面积 1.02,3.02 倍;水域以转出为主,转向草地的面积为 $8.81\times 10^3\ km^2$,占转出总面积的 2.25%。未利用地转出面积显著大于转入面积,面积比例分别为 33.70%,3.28%。

表 2 2000—2020 年西北干旱区土地利用面积转移矩阵

km^2

土地利用类型		2020 年面积						转出总计
		耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地	
2000 年面积	耕 地	61 125	1 356	5 467	565	3 372	1 430	73 315
	林 地	3 394	19 205	19 805	564	201	3 036	46 205
	草 地	25 720	12 432	389 066	4 779	1 757	117 039	550 793
	水 域	892	342	8 808	23 538	118	19 954	53 652
	建设用地	2 025	112	327	42	2 798	288	5 592
	未利用地	12 847	2 266	131 987	7 747	2 984	1 210 357	1 368 188
	合 计	106 003	35 713	555 460	37 235	11 230	1 352 104	2 097 745
	转入总计	44 878	16 508	166 394	13 697	8 432	141 747	—

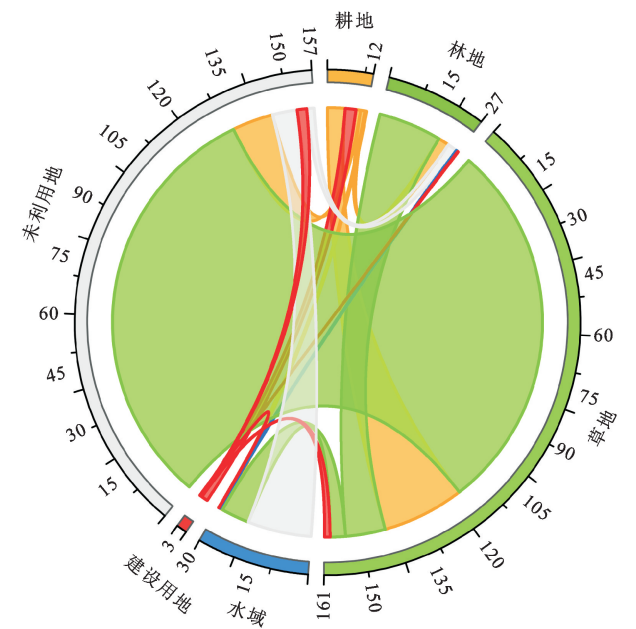


图 2 2000—2020 年西北干旱区土地利用转移数量和弦图(10³ km²)

3.1.2 未来 2100 年土地利用情景模拟分析 在 GeoSOS-FLUS 模型中采用马尔可夫链预测各类土地利用栅格数,基于 2005 年土地利用模拟了 2015 年的土地利用结果。将 2015 年模拟结果与 2015 年实际

土地利用情况进行叠合分析,计算模拟图中正确像元数与真实图像元数之间的比值(图 3),比较 kappa 指数。该值越接近 1,模拟精度越高,越接近研究区实际情况,经检验本文中 kappa 指数模拟精度为 91.28%。因此,该模型适用于本研究区土地利用模拟。

基于社会和经济不同的发展目标及政府发展规划,本研究设定了未来发展的 3 种土地利用情景(图 4)。
①自然发展情景:假定 2020—2100 期间土地利用变化不受重大政策、规划的影响,未来土地利用变化幅度、趋势延续 2000—2020 年演变发展模式,运行 Markov 转移概率矩阵得到 2100 年自然发展情景下的土地利用栅格数。
②耕地保护情景:在自然发展情景的基础上,根据《全国土地利用总体规划纲要(2006—2020 年)》《甘肃省土地利用总体规划(2006—2020 年)》《新疆维吾尔自治区土地利用总体规划(2006—2020 年)》,对耕地加以保护,确保耕地面积在各用地类中占有较多的比重,与自然发展情景相比,耕地面积约增长了 1.3 倍。
③生态保护情景:优先考虑生态效益,确保林地、草地、水域生态用地类型的数量优势,限制其大面积、大速率向其他用地类型转化,与自然发展情景相比,林地、草地、水域面积分别增长了 1.2,1.2,1.6 倍(表 3)。

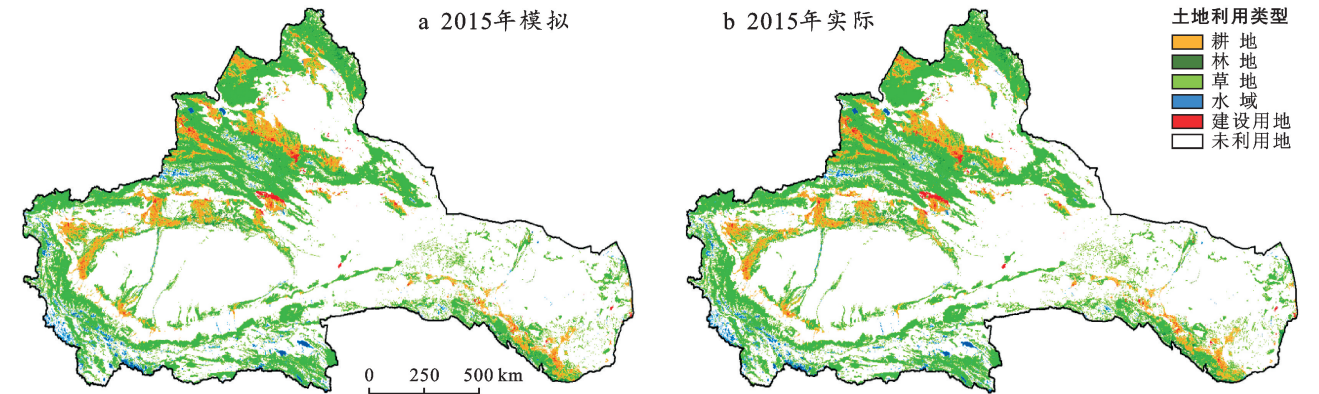


图 3 西北干旱区 2015 年实际土地利用图与模拟

情景类别	各土地利用类型面积					
	耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地
自然增长情景	154 916	37 068	602 701	43 335	15 948	1 243 777
耕地保护情景	185 899	32 530	602 701	39 857	13 371	1 223 387
生态保护情景	143 689	44 483	632 836	46 800	19 000	1 210 937

由图 5 可知,未来 2100 年与 2020 年相比,在自然发展情景下,除未利用地外其他土地利用类型均处于增长状态。耕地保护情景下,耕地面积呈增加状态,增加了 3.10×10^4 km²,其他土地利用类型不变或

减少,其中草地面积变化为 0 km²,林地、水域、建设用地分别减少了 4 538,3 478,2 577 km²。生态保护情景,具有生态效益的林地、草地、水域面积在生态保护情景下呈明显的扩张趋势,分别增加了 1.20×10^4 ,

3.02×10^4 , $6\,943\text{ km}^2$, 这表明在此情景下自然环境持续向好发展。由于未利用地被大量开发利用, 3 种情景下均呈减少特征, 分别减少了 1.08×10^5 , 2.04×10^4 , $1.25 \times 10^4\text{ km}^2$ 。

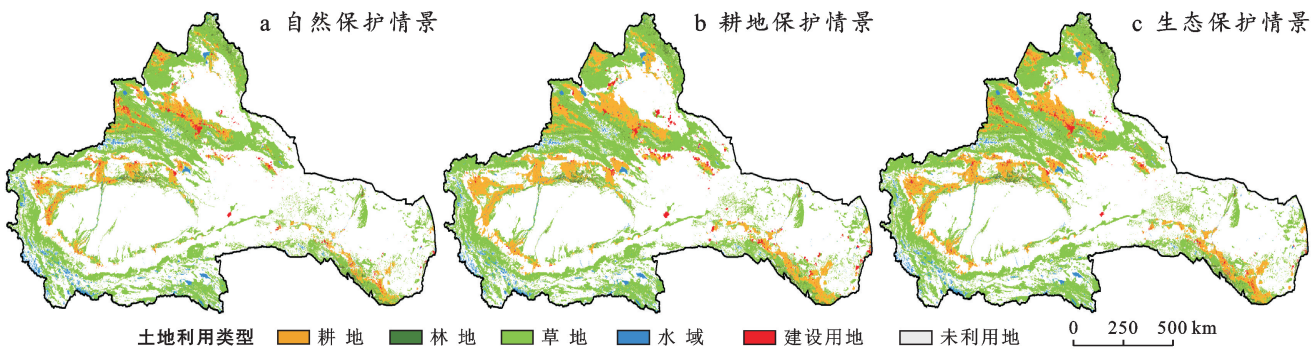


图 4 2100 年西北干旱区不同土地发展情景下的土地利用模拟结果

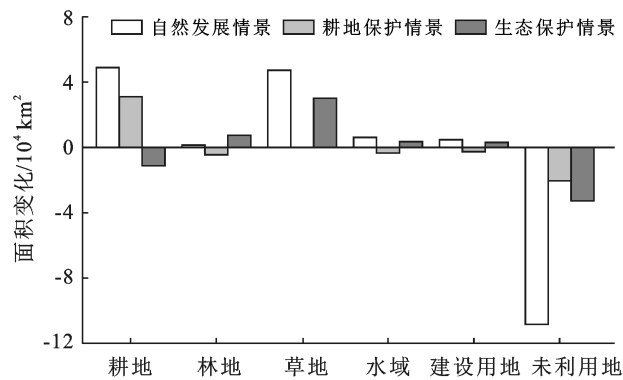


图 5 西北干旱区 3 种土地发展情景下土地利用面积变化

3.2 土地利用变化对碳储量的影响

3.2.1 2000—2020 年土地利用变化对碳储量的影响

根据 2000—2020 年土地利用转移变化及土壤、植被碳密度差异, 计算西北干旱区土地利用变化对碳储量的影响。需说明, 这里计算的碳储变化量仅指土地利用类型转移引起的变化量, 不包括未转移面积上的碳储量。由表 4 可知, 耕地转出使整个区域的碳储量减少了 $1.67 \times 10^7\text{ t}$, 其中耕地转向林地碳储量增加了 $8.50 \times 10^6\text{ t}$, 而耕地转向其他用地类型均使碳储量减少, 共减少了 $2.53 \times 10^7\text{ t}$, 其减少量远大于增加量, 故耕地转出不利于增加区域碳储量; 大量的林地转向碳密度值小的草地、未利用地和耕地, 同时部分林地转向水域和建设用地, 使林地碳储量下降了 $2.06 \times 10^8\text{ t}$; 草地转出共计流失碳储量 $6.55 \times 10^8\text{ t}$, 其根源在于大量的草地退化为未利用地, 区域生态功能趋向恶化; 水域均转向比其密度大的土地利用类型, 故碳储量增加, 共计增加 $1.14 \times 10^8\text{ t}$; 建设用地和未利用地转出使区域碳储量分别增加了 5.24×10^6 , $9.18 \times 10^8\text{ t}$, 这对减少碳排放具有十分重要的意义。

从总体来看, 2000—2020 年土地利用变化有利于提升研究区的碳储量, 其中植被碳储量和土壤碳储量

均呈增加趋势, 分别增加了 2.89×10^5 , $1.60 \times 10^8\text{ t}$, 总碳储量累计增加 $1.60 \times 10^8\text{ t}$ 。

3.2.2 未来 2100 年土地利用变化对碳储量的影响

由表 5 可知, 耕地保护情景下, 耕地面积增加了 $3.10 \times 10^4\text{ km}^2$, 耕地变化与碳储量呈正相关, 植被碳储量增加了 $7.37 \times 10^6\text{ t}$, 土壤碳储量增加了 $2.49 \times 10^8\text{ t}$, 共增加了 $2.56 \times 10^8\text{ t}$; 草地变化稳定, 面积不增不减, 对该地类上的碳储量无影响; 林地、水域、建设用地、未利用地面积, 分别下降了 4.54×10^3 , 3.48×10^3 , 2.58×10^3 , $2.04 \times 10^4\text{ km}^2$ 。随之造成该土地利用类型碳储量的流失, 其排序为: 林地>未利用地>建设用地>水域。与其他土地利用类型的碳储量相比, 耕地增加的碳储量远大于其他土地利用类型亏损的碳储总量, 说明耕地保护情景可使生态系统朝着良性方向发展, 提升整个区域的生态系统服务功能。

由表 6 统计得到, 在生态保护情景下, 耕地、未利用地的面积分别减少了 1.12×10^4 , $3.28 \times 10^4\text{ km}^2$, 林地、草地、水域面积分别增加了 $7\,415$, 3.01×10^4 , $3\,466\text{ km}^2$, 与之相对应碳储量分别减少了 9.27×10^7 , $5.46 \times 10^7\text{ t}$, 增加了 1.08×10^8 , $2.34 \times 10^8\text{ t}$, $3\,000\text{ t}$, 这说明生态保护情景生态用地面积增加可提升区域碳储量。综上, 生态用地面积增加的同时造成了耕地面积减少, 因此土地利用规划可统筹考虑生态保护和耕地保护情景, 既能增加碳汇, 又能保障粮食安全。

3.3 碳储量及碳源/汇时空变化

3.3.1 2000—2020 年碳储量及碳源/汇变化

从碳储总量变化来看, 西北干旱区 2000, 2005, 2008, 2010, 2015, 2018, 2020 年的碳储量分别为 7.86×10^9 , 7.88×10^9 , 7.89×10^9 , 7.91×10^9 , 7.93×10^9 , 7.99×10^9 , $8.02 \times 10^9\text{ t}$, 21 a 来呈持续上升趋势, 年均增长量为 $7.90 \times 10^6\text{ t}$ 。

表 4 2000—2020 年西北干旱区土地利用类型转化引起的碳储量变化

土地利用转移	面积/km ²	植被碳储量变化/10 ⁵ t	土壤碳储量变化/10 ⁵ t	总碳储量变化/10 ⁵ t
耕地—林地	1 356	8.38	77.16	85.54
耕地—草地	5 467	6.56	—34.39	—27.83
耕地—水域	565	—1.34	—45.32	—46.66
耕地—建设用地	3 372	—7.96	—75.87	—83.83
耕地—未利用地	1 430	—2.47	—91.85	—94.32
小 计	12 190	3.17	—170.27	—167.10
林地—耕地	3 394	—20.97	—193.12	—214.09
林地—草地	19 805	—98.63	—1 251.48	—1 350.11
林地—水域	564	—4.82	—77.34	—82.16
林地—建设用地	201	—1.72	—15.96	—17.68
林地—未利用地	3 036	—24.01	—367.75	—391.77
小 计	27 000	—150.16	—1 905.64	—2 055.80
草地—耕地	25 720	—30.86	161.78	130.91
草地—林地	12 432	61.91	785.58	847.49
草地—水域	4 779	—17.06	—353.31	—370.37
草地—建设用地	1 757	—6.25	—28.48	—34.74
草地—未利用地	117 039	—342.92	—6 781.24	—7 124.16
小 计	161 727	—335.19	—6 215.68	—6 550.87
水域—耕地	892	2.11	71.56	73.67
水域—林地	342	2.92	46.90	49.82
水域—草地	8 808	31.44	651.18	682.62
水域—建设用地	118	0.00	6.81	6.81
水域—未利用地	19 954	12.77	319.06	331.84
小 计	30 114	49.25	1 095.50	1 144.76
建设用地—耕地	2 025	4.78	45.56	50.34
建设用地—林地	112	0.96	8.89	9.85
建设用地—草地	327	1.16	5.30	6.46
建设用地—水域	42	0.00	—2.42	—2.42
建设用地—未利用地	288	0.18	—12.02	—11.84
小 计	2 794	7.08	45.31	52.39
未利用地—耕地	12 847	22.23	825.16	847.39
未利用地—林地	2 266	18.06	274.48	292.54
未利用地—草地	131 987	394.64	7 647.33	8 041.97
未利用地—水域	7 747	—4.49	—123.87	—128.37
未利用地—建设用地	2 984	—1.70	124.52	122.82
小 计	157 831	428.73	8 747.62	9 176.35
总 计	391 656	2.89	1 596.84	1 599.73

表 5 2100 年西北干旱区耕地保护情景
相较自然发展情景的碳储量变化

土地利用类型	面积变化/km ²	植被碳储量变化/10 ⁵ t	土壤碳储量变化/10 ⁵ t	总碳储量变化/10 ⁵ t
耕地	30 983	73.74	2 485.46	2 559.20
林地	—4 538	—38.85	—622.25	—661.10
草地	0	0.00	0.00	0.00
水域	—3 477	—0.03	0.00	—0.03
建设用地	—2 577	—0.05	—148.74	—148.80
未利用地	—20 390	—13.25	—326.04	—339.29

表 6 2100 年西北干旱区生态保护情景
相较自然发展情景的碳储量变化

土地利用类型	面积变化/km ²	植被碳储量变化/10 ⁵ t	土壤碳储量变化/10 ⁵ t	总碳储量变化/10 ⁵ t
耕地	—11 227	—26.72	—900.63	—927.35
林地	7 415	63.47	1 016.74	1 080.22
草地	30 135	107.88	2 227.88	2 335.76
水域	3 466	0.03	0.00	0.03
建设用地	3 052	0.06	176.16	176.22
未利用地	—32 840	—21.35	—525.11	—546.46

从空间分布来看(图 6),2000—2020 年,西北干旱区碳储量空间分布格局未发生显著变化,但碳储量高、中、低值分布存在空间异质性。碳储量低值区(1~1 600 t)分散分布于阿尔泰山、天山南部、伊犁盆地边缘及昆仑山南部,这些地方多分布有固态水体、湖

泊及建设用地。碳储量中值区(5 800~7 800 t)的分布与草地范围相一致,碳储量高值区(9 800~14 568 t)主要集中分布在海拔较高的山林区,如阿尔泰山林区、祁连山林区、塔里木盆地北缘绿洲区及伊犁河谷地区。

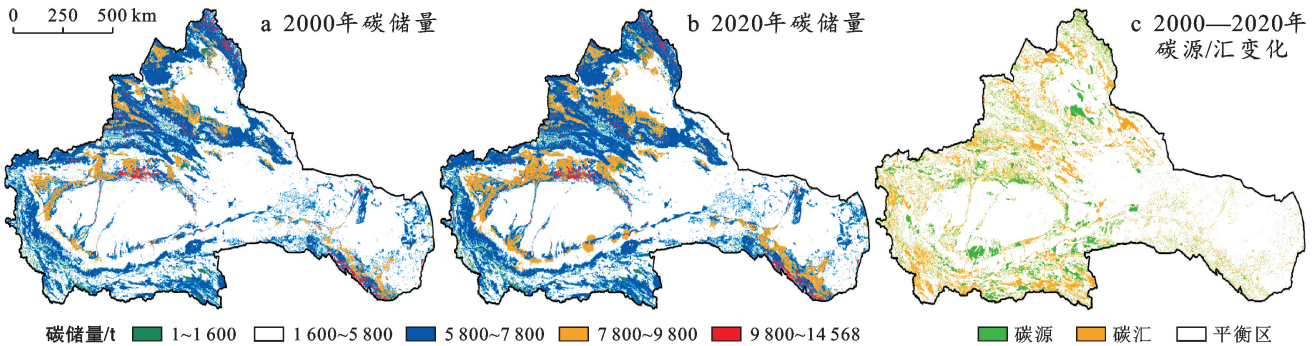


图 6 西北干旱区 2000—2020 碳储量及碳源/汇分布

根据区域实际将碳储量分布情况划分为碳汇区、平衡区、碳源区,将 0 值及基本趋近 0 值(−500~500 t)的范围划分为平衡区。由图 6 可知,2000—2020 年碳汇区面积大于碳源区,碳汇、碳源面积占比分别为 9.36%,7.82%。从空间分布来看,碳汇区主要集中分布在阿尔泰山、天山南北坡、伊犁河河谷、塔里木盆地北部、南部地区及昆仑山林区,这与碳储量高值区的分布基本一致,碳源区与碳汇区呈交错、嵌套分布于天山北坡、塔里木盆地绿洲外缘,这些区域靠近人类活动区,经济活动强烈、土地利用转换频繁,难以形成

碳汇。平衡区面积占比为 82.82%,主要分布在沙漠、戈壁等未利用地区,该区域受人类活动影响小。

3.3.2 2100 年不同情景下的碳储量及碳源/汇变化

从 2100 年 3 种土地发展情景碳储总量(图 7)变化来看,自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景下的碳储总量分别为 8.65×10^9 , 8.79×10^9 , 8.87×10^9 t,较 2020 年分别增加了 6.37×10^8 , 7.78×10^8 , 8.49×10^8 t,其中生态保护情景下碳储增量最大,说明生态类用地面积增减是西北干旱区碳储量发生变化的主要驱动力之一。

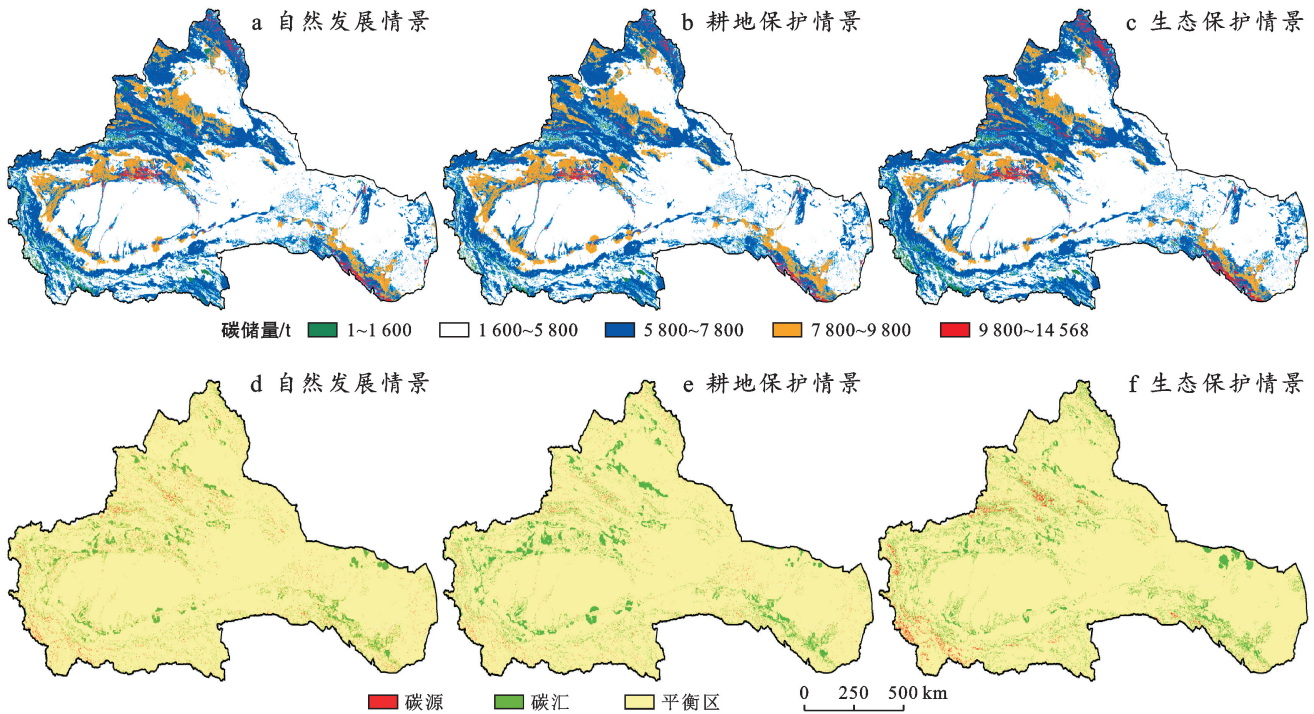


图 7 西北干旱区 2100 年自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景下的碳储量分布及碳源/汇分布

从空间布局来看(图 7a,7b,7c),未来情景下碳储量空间分布与 2000—2020 年基本一致。碳储低值区(1~1 600 t)主要分布于山间固态水体、湖泊、城镇建设用地附近;(1 600~5 800 t)的碳储量值多分布于环境恶劣荒漠区;碳储量中值区(5 800~7 800 t)沿山脉、盆地、河谷环状分布;碳储量高值(9 800~14 568 t)多分布于高海拔山地林区。与自然情景相比,耕地保护情景的碳储量值(7 800~9 800 t)范围显著扩大,由 7.38%扩大至 8.86%,这可能与耕地面积的增加有关。生态保护情景下(1~1 600 t),(5 800~7 800 t),(9 800~14 568 t)碳储量阈值区面积呈增长趋势,分别扩大了 0.17%,27.30%,0.35%,这与生态型用地面积的增长有关。总体来说,西北干旱区高、中、低值碳储量分布与土地利用类型分布密切相关。

由 3 种情景比较可知,生态保护情景下碳汇面积最大,耕地保护情景次之,自然发展情景最小。图 7d,7e,7f显示了 3 种情景下碳源/汇及碳储平衡区分布情况,平衡区面积最大,占比分别为 93.43%,92.80%,92.29%,碳汇区面积次之,占比分别为 5.40%,6.53%,6.74%,碳源区面积最小,占比分别为 1.17%,0.67%,0.97%。从整体来看,西北干旱区碳汇区明显大于碳源区,主要位于山脉及盆地周边植被茂盛的区域,可见区域碳储存能力良好,生态系统发展稳定。

4 讨论与结论

4.1 讨论

全球气候变化及人类生产生活导致的土地利用类型改变,正在深刻影响着全球 CO₂ 排放格局,控制温升、改善能源结构比重、减少碳排放,已成为许多国家在节能减排、环保方面的政治共识。西北干旱区作为我国最重要的生态屏障区之一,在国家生态安全领域起着举足轻重的作用。

为早日实现西北干旱区“碳中和”“碳达峰”的目标,本文从历史时期及未来发展情景下探究了西北干旱区碳储量及碳源/汇时空分布,历史时期碳储量持续稳定增长,未来生态保护情景下碳储量提升尤为显著。空间上,碳储量分布格局存在明显的异质性,碳储量分布与该区土地利用类型分布密切相关,碳储量高值区分布于林地、草地、耕地,中值区分布于未利用地,低值区与高值区呈嵌套状分布,本文研究结果与 Zhu 等^[25]、刘晓娟等^[26]的结论一致。一般认为,碳储量低值区分布于沙漠无人区,经分析发现碳储量低值零星分布于山脉周边,这与本区土地利用类型及自然

特征极其相关,该地多分布有高海拔山脉,植被有较强的垂直带状分布性,如山顶分布有冰川、积雪,山腰发育了大面积的林地,山麓分布有草地,缓坡谷地分布有城市带,这使得该山脉周边的碳储量分布具有高、低值嵌套分布特征。本研究区历史时期及未来均持有一定优势的碳汇水平,与湿润地区相比,因气候干旱、生态环境脆弱,其碳汇区固碳能力有限,但占全国面积 24.5%的西北干旱区保持碳汇状态对我国实现碳达峰与碳中和具有十分重要的意义。

本文所采用的土地利用碳密度数据来自前人文献研究结果,经气象因子修正得到,与直接采用全国范围内的数据相比,精度更高。郭靖等^[27]研究发现塔里木河中上游耕地地上平均碳密度为 0.57 t/hm²,草地地下平均碳密度为 1.44 t/hm²,与本文中的 0.43,1.38 t/hm² 基本一致。朱博文等^[28]研究表明山西淇河流域的水域、未利用地地上碳密度为 0.04,0.01 t/hm²,建设用地土壤碳密度为 57.63 t/hm²,与本研究中的 0.01,0.57,72 t/hm² 基本接近。综上所述,本文中计算的碳密度结果合理可靠。

4.2 结论

基于土地利用数据,采用 FLUS 模型与 InVEST 模型,本文研究了西北干旱区 2000—2020 年及 2100 年 3 种土地发展情景下土地利用变化对区域碳储量和碳源/汇的影响。

(1) 2000—2020 年西北干旱区土地利用发生了显著变化,表现为耕地、草地、建设用地面积持续增长,林地、水域、未利用地面积缩减。2020—2100 年,自然发展情景下,耕地、建设用地面积持续扩大;耕地保护情景下,耕地面积大幅度增加;生态保护情景下,林地、草地、水域面积显著增加,未利用地在 3 种情景下均呈减少状态。

(2) 2000—2020 年土地利用类型变化对碳储量的影响表明,耕地、林地、草地、水域转为其他用地不利于碳储量固存,建设用地、未利用地转为其他用地类型有利于提升区域整体的碳储量。

(3) 2100 年碳储量分布存在明显的空间异质性,碳储量高值区(9 800~14 568 t)主要分布于山脉高海拔林区,碳储量中值区(5 800~7 800 t)在区域内分布范围最广、面积最大,碳储量低值区(1~1 600 t)主要分布在沙漠、戈壁区及河西走廊地区。

(4) 2000—2020 年碳储量呈持续稳步上升趋势,碳汇量增加值为 1.59×10^8 t。与 2020 年相比,未来 2100 年 3 种土地利用情景下碳储量均有明显上升,碳汇量分别增加 6.37×10^8 , 7.78×10^8 , 8.49×10^8 t。

[参 考 文 献]

- [1] Arneth A, Sitch S, Pongratz J, et al. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2):79-84.
- [2] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850—1990 [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1999, 51(2):298-313.
- [3] Tao Yu, Li Feng, Wang Rusong, et al. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: A study from Changzhou, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103:651-657.
- [4] Arowolo A O, Deng Xiangzheng. Land use/land cover change and statistical modelling of cultivated land change drivers in Nigeria [J]. *Regional Environmental Change*, 2018, 18(1):247-259.
- [5] 徐自为, 张智杰. 基于土地利用变更调查的 2010—2016 年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(11):1909-1917.
- [6] Zhang Fan, Xu Ning, Wang Chao, et al. Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C)*, 2020, 120: 102948.
- [7] Bu Xiaoyan, Dong Suocheng, Mi Wenbao, et al. Spatial-temporal change of carbon storage and sink of wetland ecosystem in arid regions, Ningxia Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 204:89-101.
- [8] Yang Yuhai, Li Weihong, Zhu Chenggang, et al. Impact of land use/cover changes on carbon storage in a river valley in arid areas of Northwest China [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(6):879-887.
- [9] Liang Youjia, Hashimoto S, Liu Lijun. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050 [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120:106939.
- [10] 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.
- [11] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(6):1010-1019.
- [12] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(2):672-683.
- [13] 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区降水时空分布特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(17):5846-5855.
- [14] 陈亚宁. 干旱区科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [15] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [16] 白杨, 郑华, 庄长伟, 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. *生态学报*, 2013, 33(3):711-717.
- [17] 贾芳芳. 基于 InVEST 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [18] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2003, 33(1):72-80.
- [19] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5):687-699.
- [20] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006 年中国城市建成区有机碳储量的估算[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1195-1202.
- [21] 张杰, 李敏, 敖子强, 等. 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*, 2018, 32(9):132-137.
- [22] 柳梅英, 包安明, 陈曦, 等. 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*, 2010, 25(6):926-938.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Zhu Guofeng, Qiu Dongdong, Zhang Zhuanyia, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127:107770.
- [26] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 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*, 2019, 39(3):397-409.
- [27] 郭靖, 王光焰, 徐生武, 等. 水资源管理增强下的塔里木河上中游碳储量动态评估[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3):589-599.
- [28] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. *地理学报*, 2019, 74(3):446-459.