

DOI: 10.5846/stxb201911152452

刘洋,张军,周冬梅,马静,党锐,马靖靖,朱小燕.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究.生态学报,2021,41(10):4052-4065.

Liu Y, Zhang J, Zhou D M, Ma J, Dang R, Ma J J, Zhu X Y. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10):4052-4065.

基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究

刘 洋¹, 张 军^{2,3,*}, 周冬梅², 马 静², 党 锐¹, 马靖靖², 朱小燕²

1 甘肃农业大学管理学院, 兰州 730070

2 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070

3 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 兰州 730070

摘要:研究区域土地利用方式与生态系统服务碳储量的关系,对于区域生态系统保护及经济社会可持续发展具有重要意义。利用 InVEST 模型碳储量模块和 CA-Markov 模型,探究并预测疏勒河流域 1990—2015 及 2015—2040 年流域生态系统碳储量时空变化特征及其与土地利用方式之间的关系。结果表明:疏勒河流域 1990、1995、2000、2005、2010、2015 年碳储量分别为 7.994×10^8 、 7.996×10^8 、 7.998×10^8 、 8.038×10^8 、 8.064×10^8 、 8.071×10^8 t,呈逐年增加趋势,累计增加 7.7×10^6 t。土地利用类型变化是导致生态系统碳储量变化的主要因素,未利用地向耕地和草地转化有利于碳储量增加,而草地向耕地和未利用地的转化则导致碳储量减少。疏勒河流域碳储量存在显著的空间格局,碳储量较高区域呈现“北部点状-中部带状-南部点状片状”特征,这种分布格局与流域土地利用类型紧密联系。预测表明至 2040 年疏勒河流域碳储量为 9.128×10^8 t,较 2015 年增加 13.1%,主要原因是草地、耕地和林地面积较大幅度增长,提高了流域内的碳储量。

关键词:碳储量;InVEST 模型;CA-Markov 模型;疏勒河流域

Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model

LIU Yang¹, ZHANG Jun^{2,3,*}, ZHOU Dongmei², MA Jing², DANG Rui¹, MA Jingjing², ZHU Xiaoyan²

1 School of Management, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China

2 College of Resources and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China

3 Research Center for Water-saving Agriculture in Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract: The relationship between land use pattern and ecosystem services carbon storage is of great significance for regional ecosystem protection and sustainable economic and social development. This paper uses carbon storage module of InVEST model and CA-Markov model to explore and predict the spatial and temporal variation characteristics of the carbon storage of the basin ecosystems in the Shule River Basin from 1990 to 2015 and 2015—2040 and their relationships with land use patterns. The results show that the ecosystem carbon storage in the Shule River Basin in 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 and 2015 were 7.994×10^8 t, 7.996×10^8 t, 7.998×10^8 t, 8.038×10^8 t, 8.064×10^8 t and 8.071×10^8 t, respectively. The system's carbon storage was increasing year by year, with a cumulative increase of 7.7×10^6 t and an average annual increase of 0.038%. Changes in land use types are the main factors leading to changes in ecosystem carbon storage. The conversion of unused land to cultivated land and grassland is advantageous to the increased carbon storage, while the conversion of grassland to cultivated land and unused land leads to a reduction in carbon stocks. There is a significantly spatial pattern of carbon storage in the ecosystem of the Shule River Basin. The areas with high carbon storage present the characteristics of

基金项目:甘肃农业大学科技创新基金-学科建设基金(GAU-XKJS-2018-203, GAU-XKJS-2018-202);甘肃农业大学青年导师扶持基金(GAU-QDFC-2018-17);国家自然科学基金项目(71563001)

收稿日期:2019-11-15; 网络出版日期:2021-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjun@gsau.edu.cn

“northern dot-central band-southern dot and plate”, which is closely related to the land use type of the basin. The forecast indicates that the carbon storage in the Shule River Basin will be 9.128×10^8 t by 2040, an increase of 13.1% compared with 2015. The main reason is that the area of grassland, the cultivated land, and forest land has increased significantly, and the carbon storage in the basin has been increased.

Key Words: carbon storage; InVEST model; CA-Markov model; the Shule River Basin

人们长期对生态系统服务及其重要性缺乏系统了解,而气候变化和人类活动影响,使得全球生态系统服务正在下降^[1],出现荒漠化、水土流失、等一系列生态环境问题。因此,人们逐渐认识到生态系统服务不仅为人类生产生活提供必需的生态产品,而且创造和维持了地球生命支持系统。如何保证地球生态系统成为适于人类生存的生命支持系统?已经成为当前紧迫的重大任务。陆地生态系统碳汇在全球碳循环、大气 CO₂ 浓度以及全球气候变化中发挥着重要作用^[2],被认为是由于陆地生态系统和气候变化之间的相互关系而导致的生态系统变化的一个指标^[3]。陆地生态系统固碳作用能够影响区域气候的变化,对缓解全球变暖具有重要作用^[4]。土地利用类型的变化通常伴随着大量的碳交换^[5],由土地利用变化导致的碳排放在全球范围内有很大比重^[6]。因此,研究碳储量与土地利用变化的响应关系,对于区域生态环境保护和经济社会发展具有重要实践意义。

传统的碳储量估算方法如蓄积量法、生物量法、箱式法等对碳储量估算清晰明确,操作简便,应用比较广泛^[7],但并不能准确反映长时间序列与大尺度的碳储量变化对自然和人类活动的响应关系。随着信息技术发展,以模型模拟为主的碳储量估算方法应运而生。相比其他研究方法,InVEST 模型具有需求数据少,运行速度快的特点^[8],可实现碳储量空间分布与动态变化空间制图,反映土地利用变化与碳储量之间关系,实现动态量化生态服务功能价值,不同于以往服务价值评估的单一化、静态化,被广泛运用于不同国家与地区^[9]。Jiang 等^[10]运用 CLUE-S 模型预测 2023 年土地利用类型,在此基础上估算 1995—2023 年碳储量变化;张影等^[11]运用 InVEST 模型估算及分析了 2010 年甘肃白龙江流域碳储量及其空间格局,并探讨了海拔、坡度和坡向对碳储量空间分布的影响。

CA-Markov(元胞自动机-马尔科夫模型)被广泛应用于土地利用、城市增长和扩散等诸多领域。该模型综合了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型长期预测的优势,既提高了土地利用类型转化的预测精度,又可以有效模拟土地利用格局的空间变化,具有较好的科学性和实用性^[12-13]。Firozjaei 等^[14]开发基于方向的方法来改善 CA-Markov 模型的模拟性能,在 1985 年、2001 年和 2015 年在伊朗巴布尔市进行了测试,结果显示该方法精度更高。Bhagawat Rima 等^[15]研究了 1989—2016 年尼泊尔东部城市建设用地与耕地的面积变化,并采用 CA-Markov 模型结果表明在 2026 和 2036 年建设用地面积激增和耕地面积减少对该地区的粮食安全和环境平衡将产生负面影响。

目前,关于 InVEST 模型的评估研究,时间尺度上多集中于现在或过去,对未来模拟较少,国内研究多集中于东南地区。Gaglio 等^[16]评估了保罗·杜·基奎洛自然保护区(Paul do Boquilobo)1967、1990 和 2015 年的生态系统服务功能,并进一步模拟评估了 2050 年“高生产力农业”和“自然植被完全覆盖”两种情景下的生态系统服务功能。黄康等^[17]利用 CA-Markov 模型对福州新区 2030 年土地利用格局进行模拟,并利用 InVEST 模型中生境质量模块对该地区生态系统服务功能进行评估。疏勒河流域位于西北内陆干旱区,生态环境脆弱,却具有极重要的生态系统服务功能,也是国家“一带一路”战略的重要陆路节点。本文将 InVEST 模型与 CA-Markov 模型结合,可以很好地提高土地利用类型的预测精度,同时为 InVEST 模型中碳储存模块提供数据基础,进而模拟未来疏勒河流域的生态系统服务碳储量功能,以期为提高该流域生态系统服务功能提供参考。

1 研究区概况

疏勒河流域(38°00′—42°48′N,92°11′—98°30′E),是河西地区三大内陆河流域之一,地处河西走廊最西

端,包括玉门市、敦煌市、瓜州县和肃北蒙古族自治县,流域总面积约 $11.39 \times 10^4 \text{ km}^2$,东接张掖市和内蒙古自治区,南接青海省,西接新疆哈密市,北接蒙古国^[18]。地势南北高、中间低,南部为阿尔金山及祁连山脉,北部为马鬃山,中间地势相对平缓(图1)。流域属于大陆性干旱荒漠气候,光热资源丰富,无霜期长,降水少、蒸发大,海拔 802—5573m。流域北部为阿拉善高原半荒漠生态区,中部为河西走廊绿洲农业生态区,西南和南部为柴达木盆地荒漠-盐壳生态区,东南部为祁连山针叶林-高寒草甸生态区^[19]。

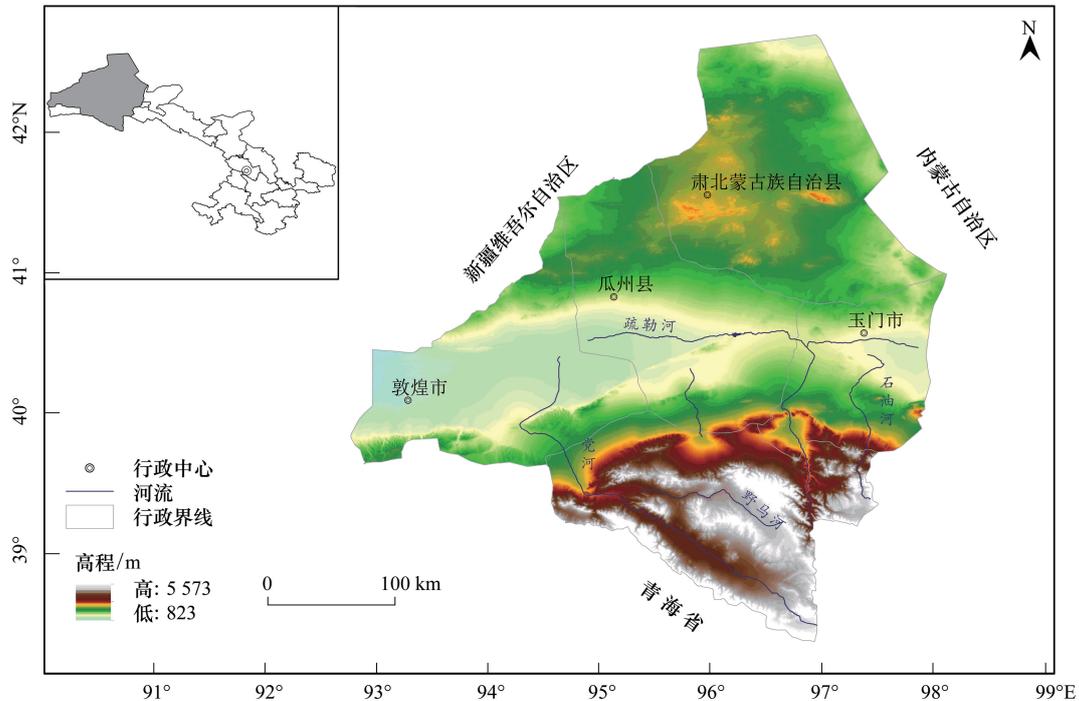


图1 研究区位置

Fig.1 The map of research region

疏勒河流域独特的地理环境形成了独特的社会经济空间格局,经济活动集中在绿洲区,农业生产高度依赖灌溉水源。土地面积广阔,但水资源有限^[20]。自 20 世纪 90 年代起,研究区陆续接收“两西建设移民”、“疏勒河农业开发暨移民安置工程移民”、“引洮工程九甸峡库区移民”以及自发性移民 10 多万人^[21]。人口规模快速增加,导致耕地面积和建设用地面积急剧扩张,土地利用格局发生了较大变化。流域内自然条件严峻,加之人为活动,存在着土地沙化严重、低洼地区土壤次生盐渍化现象普遍以及湿地萎缩等生态问题,因此,定量评估和预测流域内生态系统服务功能具有十分重要的现实意义。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 InVEST 模型

InVEST 模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) 即“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,是由自然资本项目支持开发的、免费开源的、可以量化多种生态系统服务功能的模型^[8]。

InVEST 模型碳储量模块将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库:地上生物碳(土壤以上所有存活的植物材料中的碳)、地下生物碳(存在于植物活根系中的碳)、土壤碳(分布在有机土壤和矿质土壤中的有机碳)、死亡有机碳(凋落物、倒立或站立的已死亡树木中的碳)。根据土地利用/覆被的分类情况,分别对不同地类地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机碳库的平均碳密度进行计算统计,然后用各个地类的面积乘以

其碳密度并求和,得出研究区的总碳储量。其计算公式如下:

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

式中, C_{total} 为流域总碳储量 (t/hm^2); C_{above} 为地上部分碳储量 (t/hm^2); C_{below} 为地下部分碳储量 (t/hm^2), C_{soil} 为土壤碳储量 (t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机碳储量 (t/hm^2)。

2.1.2 CA-Markov 模型

基于 IDRISI 17.0 中的 CA-Markov 模块对研究区土地利用格局变化进行模拟。具体过程如下:①确定 1990—2000 年和 1990—2015 年研究区土地利用类型转移面积矩阵和转移概率矩阵,用来进行 CA-Markov 模型检验精度和结果预测;②利用多标准评价模块 (Multi-criteria Evaluation, MCE) 建立土地利用类型变化适宜性规则图集。以限制性因素和驱动因素作为自变量进行分析,得到每种地类的空间分布概率图,再利用 Collection editor 模块将所有概率图集成在一个图集中;③构造 CA 滤波器。本文采用 5×5 摩尔邻域作为 CA-Markov 模型的滤波参数^[22-23];④确定起始时刻及迭代次数。首先以 1990—2000 年为预测起始时刻,设定 CA 的迭代次数为 10,模拟研究区 2010 年的土地利用类型空间分布。对模拟结果进行精度验证后,以 1990—2015 年为预测起始时刻,设定迭代次数为 25,预测研究区 2040 年的土地利用类型。

为了确保模拟结果的准确性,采用 Kappa 指数对模拟结果进行检验。运用 IDRISI 17.0 软件中 CROSSTAB 模块,输入研究区 2010 年实际土地利用类型图与预测土地利用类型图进行精度检验,得到 2010 年的 Kappa 系数为 0.92,表明模拟效果较好,可使用通过验证的 CA-Markov 模型规则进行 2040 年土地利用类型预测。

2.2 数据来源

2.2.1 行政边界数据

行政边界数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/data>),经过提取得到疏勒河流域矢量数据。

2.2.2 土地利用类型数据

土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/data>),包括 6 个一级类和 26 个二级类,经合并和重分类后将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类(表 1),裁剪后得到 1990、1995、2000、2005、2010 和 2015 六期疏勒河流域土地利用类型图,分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。

表 1 疏勒河流域土地利用类型分类表

Table 1 Classification of land use types in the Shule River Basin

编码 Code	地类 Landuse type	原编码 Original code	原地类 Original landuse type
1	耕地	12	旱地
2	林地	21、22、23、24	有林地、灌木林、疏林地、其他林地
3	草地	31、32、33	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
4	水域	41、42、43、44、45、46	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地
5	建设用地	51、52、53	城镇用地、农村居民点、其他建设用地
6	未利用地	61、62、63、64、65、66、	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地、其他

2.2.3 碳密度数据

根据模型用户手册,InVEST 模型中的碳储存模块所做的假设是将某一土地利用类型的碳密度看作是一个常量。碳密度数据从前人研究文献中得到^[24-32](表 2)。在选取文献时应注意:一、由于不同学者得出碳密度存在差异,为避免数据相差过大,尽量选择同一作者数据;二、尽可能选择以北方,特别是以西北为研究区的文献数据为参考,避免选择南方或世界范围的数据。最终得到不同土地利用类型的碳密度表。

表 2 疏勒河流域土地利用各部分碳密度/(t/hm²)^[24-32]

Table 2 Carbon density table of various parts of land use in the Shule River Basin

土地利用类型 Landuse type	地上碳密度 $C_{above}/(t/hm^2)$	地下碳密度 $C_{below}/(t/hm^2)$	土壤碳密度 $C_{soil}/(t/hm^2)$	死亡有机物碳密度 $C_{dead}/(t/hm^2)$
耕地 Cultivated land	5.7	80.7	108.4	13
林地 Forest	42.4	115.9	236.9	13
草地 Grassland	35.3	86.5	99.9	2
水域 Water	0	0	0	0
建设用地 Construction land	1.2	0	0	0
未利用地 Unused land	9.1	0	21.6	0

C_{above} : Biological carbon storage on the ground; C_{below} : Biological carbon storage under the ground; C_{soil} : Soil carbon storage; C_{dead} : Dead organic carbon storage

2.2.4 DEM 与 slope 数据

DEM 数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>); 在 ArcGIS 10.5 中利用 DEM 数据得到坡度 (slope) 栅格数据, 空间分辨率为 90m×90m。

2.2.5 道路数据

道路数据来自 OSM (Open Street Map, <https://www.openstreetmap.org>), 包括高速公路和城市交通道路, 数据格式为矢量。

3 结果与分析

3.1 疏勒河流域 1990—2015 年碳储量变化

利用 InVEST 模型中 Carbon 模块分别计算了疏勒河流域 1990、1995、2000、2005、2010、2015 年的碳储量数据。

从数量来看 (图 2), 疏勒河流域 1990、1995、2000、2005、2010、2015 年的碳储量分别为 7.994×10^8 、 7.996×10^8 、 7.998×10^8 、 8.038×10^8 、 8.064×10^8 、 8.071×10^8 t, 呈现增加趋势, 总体增加了 7.7×10^6 t。其中, 1990—2005 年碳储量增加缓慢; 2000—2005 年碳储量上升较快, 增加了 4×10^6 t, 增幅为 0.5%, 主要源于耕地面积的增加, 其中, 瓜州县和玉门市耕地面积增加最多, 主要是由于移民安置项目的实施, 其中瓜州县接收甘肃省 14 个县区移民 22925 人^[33]; 玉门市接收“两西”建设移民 15366 人^[34], 人口增加促使耕地面积增加。1996 年, 疏勒河农业灌溉暨移民安置综合开发项目实施, 在疏勒河上游新建昌马水库枢纽工程, 同时在昌马 (31333.33 hm²)、双塔 (16200 hm²)、花海 (7066.67 hm²) 三大灌区新增保灌面积 54600 hm², 以及营造防护林 4700 hm², 经济林 3333.33 hm² 和封滩封沙育林 14241.6 hm²^[35]。因此, 耕地增加是该时期碳储量快速增长的主要原因 (图 3)。

从土地利用类型来看 (图 3), 疏勒河流域不同时期不同土地利用类型的碳储量略有变化。主要表现为: 耕地、林地、建设用地、草地碳储量增加, 未利用地碳储量减少, 其中, 耕地碳储量增加较为明显。流域内不同土地利用类型碳储量对流域总碳储量的贡献值由大到小依次为: 草地、未利用地、耕地、林地、建设用地和水域。1990—2015 年, 草地总面积最大时为 20180 km², 仅占流域总面积的 17.71%, 但碳储量占流域总碳储量的 57%, 是流域最主要的碳库。未利用地的面积占整个流域面积约 80%, 碳储量占流域总碳储量的 35%, 其面积和碳储量呈下降趋势, 但仍是流域的主要碳库之一。

由图 4 可知, 流域内总碳储量与地上生物碳储量有显著负相关性, 农作物和草地作为一年生植物, 无法长

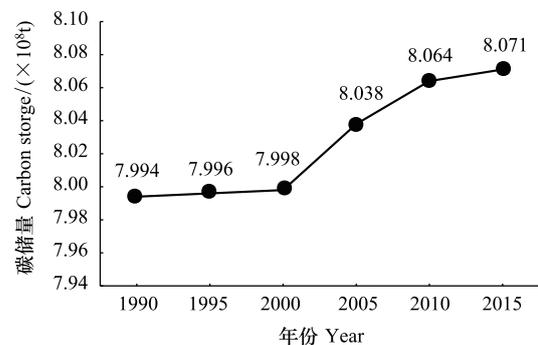


图 2 疏勒河流域各年份碳储量及变化趋势

Fig.2 Carbon storage and trend of each year in the Shule River basin

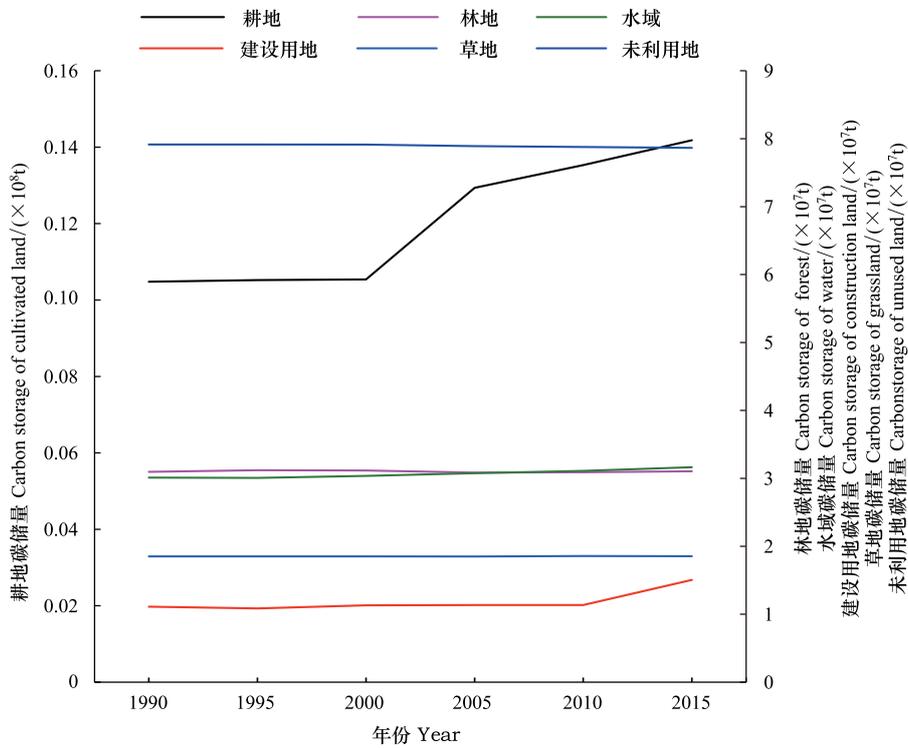


图3 疏勒河流域各年份各土地利用类型碳储量

Fig.3 Carbon storage of different land use types in different years in the Shule River Basin

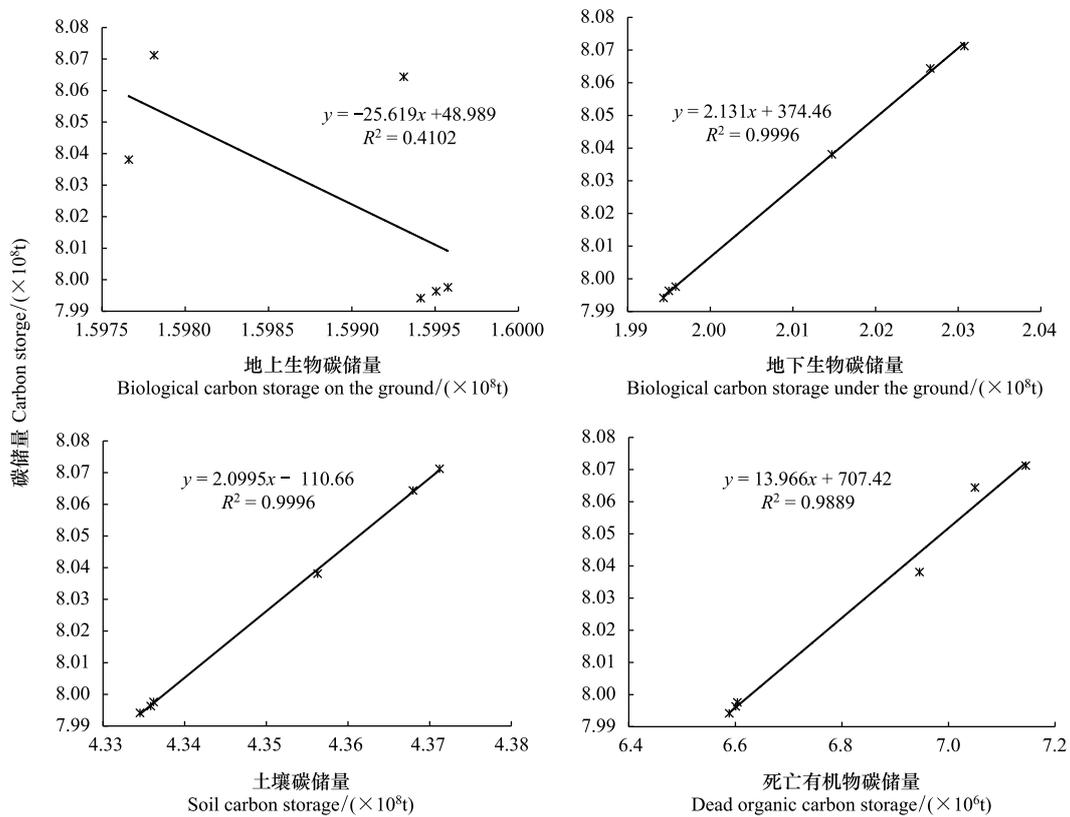


图4 疏勒河流域地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量、死亡有机物碳储量与总碳储量的相关关系

Fig.4 Relation between biological carbon storage on the ground, biological carbon storage under the ground, soil carbon storage, dead organic carbon storage and total carbon storage in the Shule River basin

期将碳固定在地上,因此总碳储量与地上生物碳储量呈显著负相关性和大面积的一年生植被秋冬季节枯萎而导致的地上碳储量的损耗有极大关系;流域内总碳储量与地下生物碳储量、土壤碳储量和死亡有机物碳储量呈显著正相关关系,因为植被土壤中的碳含量约是地上生物量的3倍,是大气中碳含量的2倍^[36-37],是总碳储量的最大碳来源。

3.2 疏勒河流域碳储量空间变化特征

从空间来看(图5),碳储量较高的区域呈现“北部点状-中部带状-南部点状片状”分布且空间变化不大的特征,“点状”指的是肃北(北)以马鬃山为主的部分区域碳储量较高;“带状”指的是流域中部疏勒河两岸绿

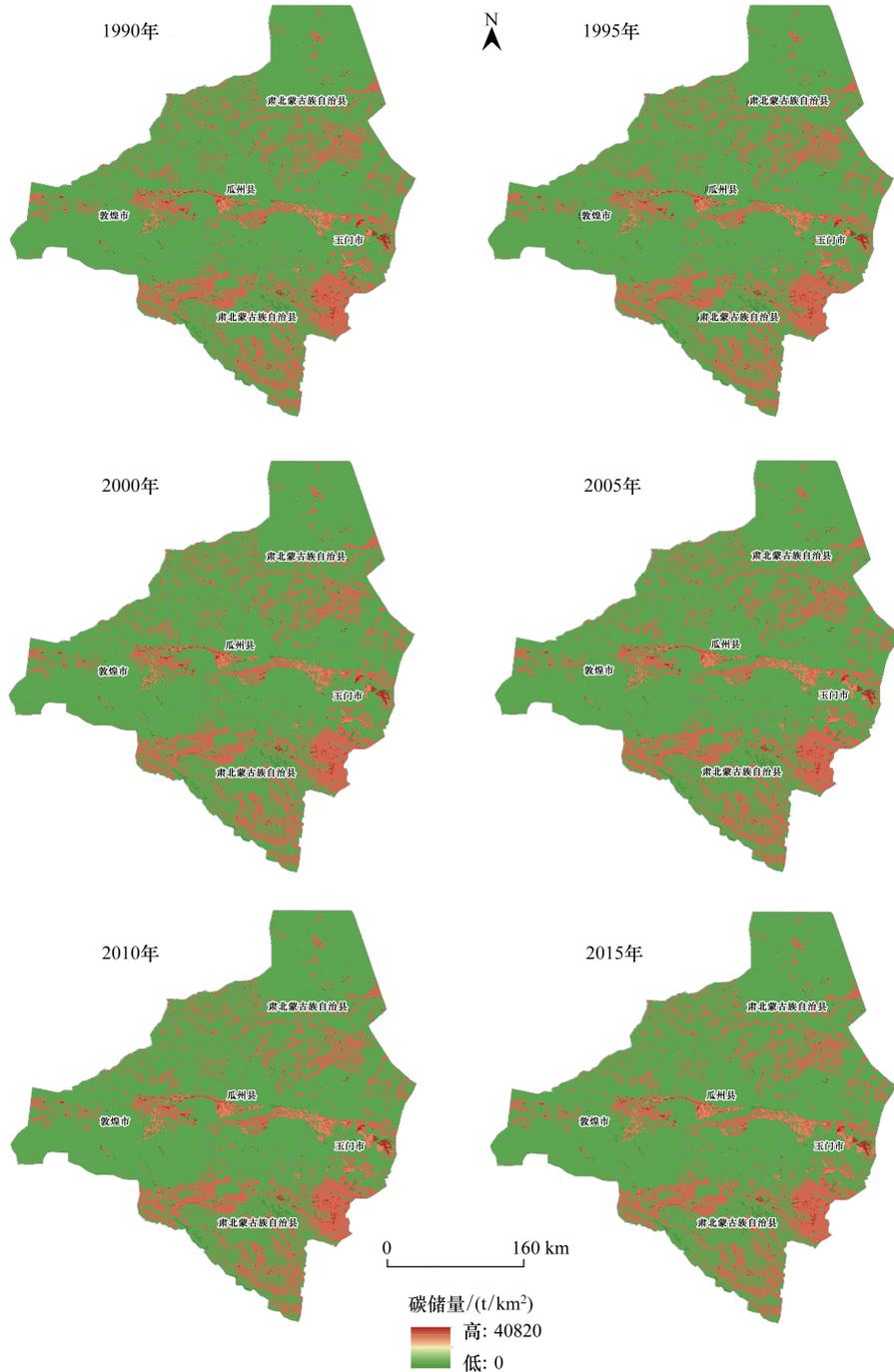


图5 1990、1995、2000、2005、2010和2015年疏勒河流域碳储量时空分布图

Fig.5 Temporal and spatial distribution of carbon storage in the Shule River Basin in 1990、1995、2000、2005、2010 and 2015

洲地区碳储量分布;“点状片状”指的是玉门市和肃北(南)交界地区以及肃北(南)中西部碳储量较高值呈片状分布,而在肃北(南)南部碳储量的较高值则以点状分布。

1990—2015 年疏勒河流域碳储量空间变化较小,碳储量较高的地区主要分布在流域绿洲以及肃北。具体来说,主要分布于敦煌东部、瓜州中部、玉门中部和南部、肃北(南),肃北(南)分布较为较广,肃北(北)南部分布较多,这些地区植被面积较大,碳储存能力较强。最高值为 $40820\text{tC}/\text{km}^2$,分布在玉门东北部、肃北(南)东北部和敦煌东部,这些地区土地利用类型主要为林地,土壤碳密度较大;最低值为 $0\text{tC}/\text{km}^2$,主要分布于肃北(南)的祁连山,主要地类为水域(冰川积雪、河流等)。

为了更清楚的反映疏勒河流域碳储量的空间变化,将 1990—2015 年碳储量空间变化值分别为三类:减少、基本不变和增加。对前后两个时期碳储量分布图进行栅格减法运算,得到每个栅格值的增减变化情况。经过栅格重分类,将碳储量变化值大于 5% 定义为增长区域,变化值小于 5% 定义为碳储量减少区域,将变化值介于 $\pm 5\%$ 之间的定义为碳储量基本不变区域。由图 6 可知,1990—2015 年,大部分地区的碳储量基本不变,占到流域总面积的 99.41%;碳储量减少的面积为 159km^2 ,仅占流域总面积的 0.14%,零散分布在瓜州和玉门市的中部;碳储量增加的面积为 512km^2 ,占流域总面积的 0.45%,主要分布在敦煌、瓜州和玉门中部的绿洲地区,肃北分布较少且较零散。总体来说,大部分地区碳储量空间变化较小,碳储量增加和减少的区域面积仅占总面积的 0.59%。变化较大的区域主要分布在流域中部的绿洲地区,这些区域人类活动频繁,土地利用方式变化较之其他区域更为剧烈。由于退耕还林等生态环境政策实施,后期植被面积不断扩大,碳储量呈现增大的趋势。

3.3 疏勒河流域土地利用类型变化及其对碳储量的影响

疏勒河流域大部分地区为未利用地,而耕地、林地、建设用地和水域主要分布在流域中部的绿洲地区,草地分布较为广泛,除了疏勒河两岸,玉门南部、肃北(南)都广泛分布,肃北(北)的草地分布则较为分散。研究期间,各类用地均发生了变化。1990—2015 年,流域内土地利用变化主要以耕地和未利用地为主,耕地面积增加了 433km^2 ,增幅达到为 36.66%,主要出现在瓜州、玉门河流两岸的绿洲地区;未利用地面积变化最大,减少了 536km^2 ,相较于 1990 年减少了 0.59%;建设用地增加了 64km^2 ,相比较 1990 年增幅为 30.19%;水域面积增加了 29km^2 ,增幅达到 5.21%;草地面积增加了 8km^2 ,增幅为 0.039%,敦煌市和玉门市增加面积较大;林地面积增加了 2km^2 ,增幅为 0.36%,玉门东部地区增长面积较大。

表 4 反映了 1990—2015 年由于土地利用变化而导致的碳储量的变化情况。由表 4 可知,土地利用变化导致疏勒河流域碳储量增加约 $7.7 \times 10^6\text{t}$,主要是因为大面积的未利用地转化为耕地和草地,植被覆盖使得土壤和植被地上、地下碳储量增加,增加了流域总碳储量;林地向耕地、草地和未利用的转出非常不利于碳储量的增加;由于水域的碳密度设为 $0\text{t}/\text{hm}^2$,因此,水域的转出有利于碳汇形成,增加了流域碳储量。

1990—2015 年,耕地面积持续增长,2000—2005 年增长速度最快,主要是由于移民安置工程实施后,人口大量增加,兴修水库,农业灌溉面积增加;2000—2012 年玉门和瓜州总人口从 28.58 万人减少到 26.87 万人,但农村人口却从 14.47 万人增加到 19.63 万人,导致耕地面积快速增加^[38],从转移方向来看主要是以草地和未利用地位为主,说明这一时期耕地的来源主要是开荒造田,植被面积不断扩大,增加了区域碳储量。



图 6 疏勒河流域 1990—2015 年碳储量空间分布变化

Fig. 6 Spatial distribution changes of carbon reserves in the Shule river basin from 1990 to 2015

表 3 1990—2015 疏勒河流域土地利用类型变化

Table 3 Land use change in the Shule river basin from 1990 to 2015

土地利用类型 Landuse type		1990	1995	2000	2005	2010	2015
耕地 Cultivated land	面积/km ²	1181	1187	1185	1463	1537	1614
	比例/%	1.0368	1.0420	1.0404	1.2843	1.3493	1.4169
林地 Forest	面积/km ²	556	562	562	554	556	558
	比例/%	0.4881	0.4934	0.4916	0.4863	0.4881	0.4899
草地 Grassland	面积/km ²	20172	20168	20180	20143	20205	20180
	比例/%	17.7086	17.7051	17.7156	17.6831	17.7375	17.7156
水域 Water	面积/km ²	556	556	561	570	576	585
	比例/%	0.4881	0.4881	0.4925	0.5004	0.5057	0.5136
建设用地 Construction land	面积/km ²	212	206	216	216	216	276
	比例/%	0.1861	0.1808	0.1896	0.1896	0.1896	0.2423
未利用地 Unused land	面积/km ²	91234	91232	91207	90965	90821	90698
	比例/%	80.0924	80.0906	80.0704	78.8562	78.7298	78.6218

表 4 1990—2015 年疏勒河流域土地利用类型转化及其引起的碳储量变化

Table 4 Land use type conversion and its carbon storage changes in the Shule River Basin from 1990 to 2015

土地利用类型转换 Land use type conversion	面积 Area/km ²	碳储量变化 Carbon stock changes/10 ⁵ t	小计 Sum/10 ⁵ t
耕地-林地 Cultivated land-Forest	2.97	0.596	
耕地-草地 Cultivated land-Grassland	25.37	0.411	
耕地-水域 Cultivated land-Water	4.21	-0.874	-2.98
耕地-建设用地 Cultivated land-Construction land	4.04	-0.833	
耕地-未利用地 Cultivated land-Unused land	12.6	-2.28	
林地-耕地 Forest-Cultivated land	17.06	-3.420	
林地-草地 Forest-Grassland	4.25	-0.784	-3.752
林地-水域 Forest-Water	—	—	
林地-建设用地 Forest-Construction land	—	—	
林地-未利用地 Forest-Unused land	3.93	-1.484	
草地-耕地 Grassland-Cultivated land	165.25	-2.596	
草地-林地 Grassland-Forest	11.76	2.170	
草地-水域 Grassland-Water	4.37	-0.978	-13.865
草地-建设用地 Grassland-Construction land	9.85	-2.192	
草地-未利用地 Grassland-Unused land	68.75	-13.269	
水域-耕地 Water-Cultivated land	3.57	0.741	
水域-林地 Water-Forest	—	—	
水域-草地 Water-Grassland	—	—	0.81
水域-建设用地 Water-Construction land	—	—	
水域-未利用地 Water-Unused land	2.26	0.069	
建设用地-耕地 Construction land-Cultivated land	2.74	0.565	
建设用地-林地 Construction land-Forest	1	0.407	
建设用地-草地 Construction land-Grassland	0.03	0.0067	0.98
建设用地-水域 Construction land-Water	—	—	
建设用地-未利用地 Construction land-Unused land	0.03	0.00089	
未利用地-耕地 Unused land-Cultivated land	296.64	52.446	
未利用地-林地 Unused land-Forest	11.71	4.436	
未利用地-草地 Unused land-Grassland	230.21	44.431	98.963
未利用地-水域 Unused land-Water	24.78	-0.745	
未利用地-建设用地 Unused land-Construction land	54.39	-1.605	
总计 Sum			77.14

林地面积变化呈现“增长-下降-增长”趋势。20 世纪 70 年代起,疏勒河流域先后被列为“三北”防护林体系建设工程、平原绿化工程等生态工程建设区域,在生态工程的推动下,林地面积不断增加^[20]。1990—1995 年增长速度较快,随后面积开始减少,2005 年之后开始缓慢增长;从转移方向看,林地的转入主要为草地和未利用地。树木的固碳潜力取决于其生物量,尤其是地上生物量在评估树木生物量时被广泛考虑^[39],森林强大的固碳能力使其成为生态系统中最大的碳库^[40],林地面积扩大增加了总碳储量。

草地面积呈现波动变化趋势,2005 年面积减少到最小值为 20143km²,2005—2010 年面积迅速增大,2010 年后开始减少。草地的转出主要为耕地和未利用地,说明毁草造田和荒漠化是草地减少的原因,同期,草地的转入主要为未利用地和耕地,表明荒地种草和退耕还林是草地面积增加的主要方式。退耕还林还草工程(1999 年启动)、草原沙化防护工程(2001 年启动)、退牧还草工程(2003 年启动)^[20]等生态工程的实施,使植被面积扩大,使得更多碳固定在土壤中^[39]。

1990—2010 年建设用地面积较为稳定,2010 年后迅速增加。从转移方向看,建设用地很少为转出为其他的地类,而转入建设用地主要为未利用地和草地,说明城镇用地和农村居民地会占用周边耕地,而交用地、工矿仓储等用地则占用未利用地。20 世纪 80 年代,政府实施了一系列移民安置工程,极大促进了耕地和城乡建设用地的扩张,加速草地、水域湿地及无植被区向耕地和城建用地的转变;同时由于玉门油田等生活基地搬迁、玉门新区等新兴城市建设的加速,区域内建设用地急剧扩张。移民城镇化导致区域内建设用地不断占用耕地、草地和未利用地^[41]。

未利用地面积呈现持续减少趋势,从转移方向看,未利用地的转出主要为耕地和草地。同期,转入未利用地的地类主要为草地,说明草地和未利用地之间呈现相互转化的趋势,且未利用地转入草地的面积大于由草地转入的面积。未利用地向耕地、草地的流入主要是由于人口的增加和环境保护政策的实施,植被覆盖面积的增加提高了流域的总碳储量。

为进一步探究土地利用变化对流域内碳储量变化的影响,计算了 1990—2015 年各土地利用类型变化与碳储量的相关性(水域地上生物、地下生物、土壤和死亡有机物碳密度都为 0,因此不做分析)。

由图 7 可知,流域总碳储量与耕地、草地、建设用地的面积与流域总碳储量呈正相关关系,其主要原因是研究期内植被面积的增加,提高了土壤中固碳量;林地、未利用的面积与总碳储量呈现负相关关系,未利用地面积持续减少,转入碳密度较高的植被地类,导致其与总碳储量呈现负相关的关系。

3.4 疏勒河流域 2015—2040 年碳储量时空分布特征

首先利用 IDRISI 17.0 中 CA-Markov 模型得到 2040 年土地利用类型图,然后同碳密度数据在 InVEST 模型的 Carbon 模块中运行,最终获得 2040 年疏勒河流域碳储量及空间分布图。

2040 年,疏勒河流域碳储量为 9.128×10^8 t,较 2015 年增加了 13.1%。呈现“北部片状-中部带状-南部点片状”分布(图 8),北部即肃北(北)由于草地面积增长,碳储量分布也由点状分布变为面状分布;中部碳储量主要分布在河流两岸绿洲地区,最高值出现在玉门市以及敦煌市的东部的林地;南部肃北(南)碳储量呈点状分布,主要地类为祁连山的高山草甸,流域的东南部碳储量呈现面状分布,主要地草地。

2015—2040 年疏勒河流域碳储量空间变化如图 9 所示。经过重分类后可得:碳储量减少的面积为 3417km²,占流域总面积的 3%,增加的面积为 8304km²,占流域面积的 7.29%,而大部分地区的碳储量呈现稳定状态。肃北(北)碳储量增加的面积较大,主要因为草地面积的增大;而在肃北(南),碳储量增加和减少的现象并存,总体变化不大;在敦煌、瓜州和玉门,碳储量呈现增加趋势,主要是由于草地、耕地、林地面积增大。

相比 2015 年,疏勒河流域耕地、林地、草地、水域、建设用地的面积增加,未利用地面积减少,其中,草地的面积增加的最多,为 4766km²,其次为耕地和林地,分别增加了 678km²和 429km²,建设用地和水域的面积增加较少,分别增加了 149km²和 107km²,未利用面积减少较大,为 6088km²。疏勒河流域降水稀少,生态环境脆弱,因此,流域内仍然需实行严格的生态环境保护措施,退耕还林还草政策的实行使自然植被面积不断扩大,在肃北(北),原来呈“点”状分布的草地在面积扩大到一定程度后与周围“点”状分布的地类连接,呈现“片”

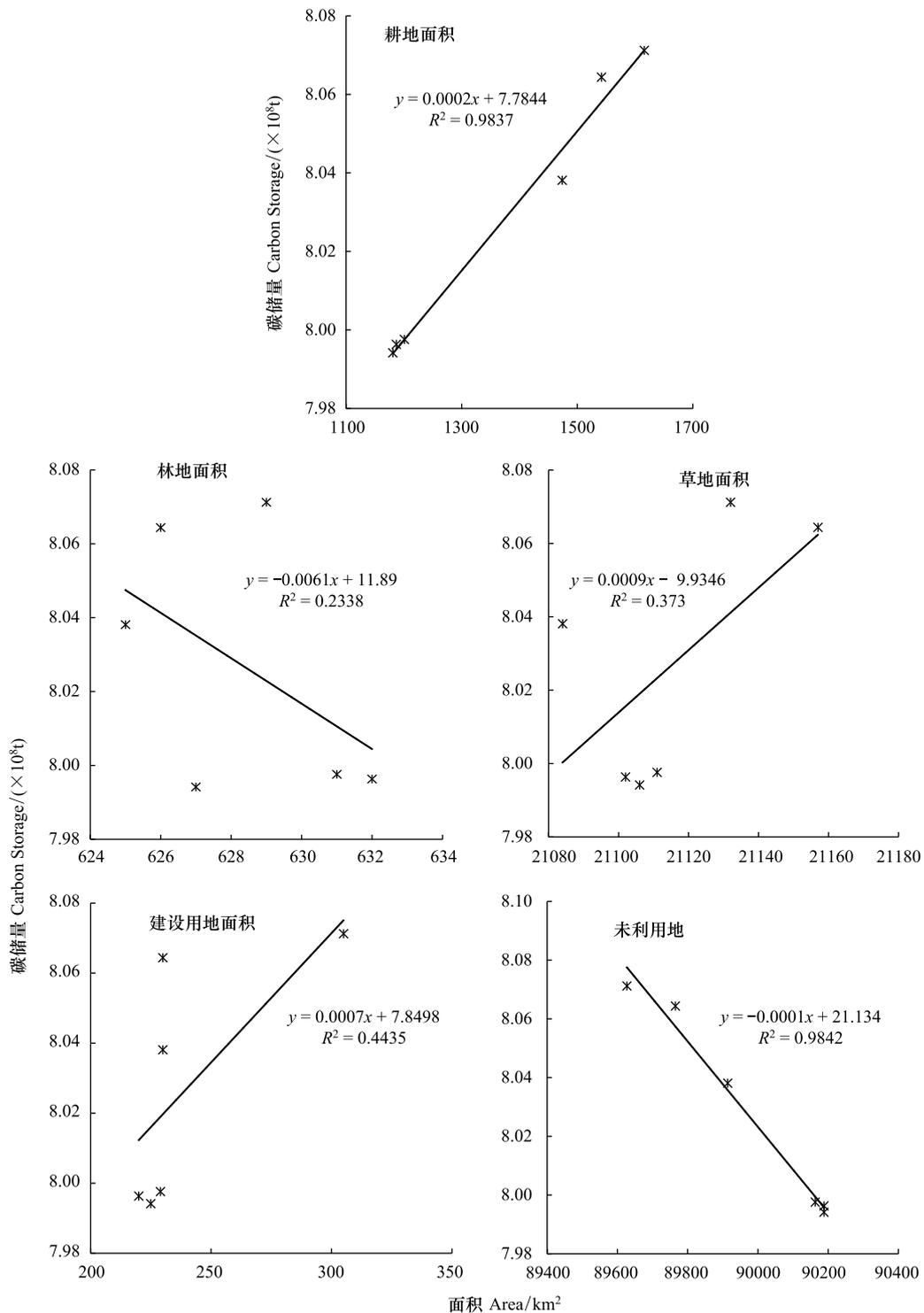


图 7 疏勒河流域耕地、林地、草地、建设用地和未利用地与总碳储量的相关关系

Fig.7 Correlation between cultivated land, forest, grassland, construction land, unused land and total carbon storage in the Shule River Basin

状的分布;为了实现使流域内水资源的高效利用和充分保护,政府部门实施高效的水资源利用计划,在确保流域生产生活用水的同时,保证了生态用水。灌溉用水的高效节约,为耕地面积的扩大提供了可能,同时,上游节约水资源,最大限度保障了下游的生态用水,植被面积不断扩大,提高流域碳储量,改善流域生态环境。

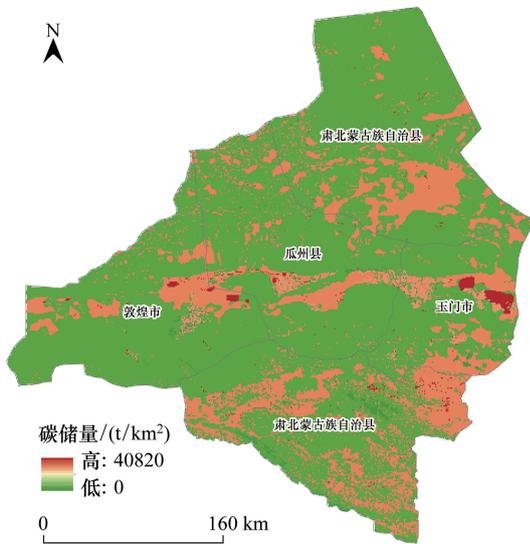


图 8 2040 年疏勒河流域碳储量空间分布

Fig.8 Spatial distribution map of carbon storage in the Shule river basin in 2040

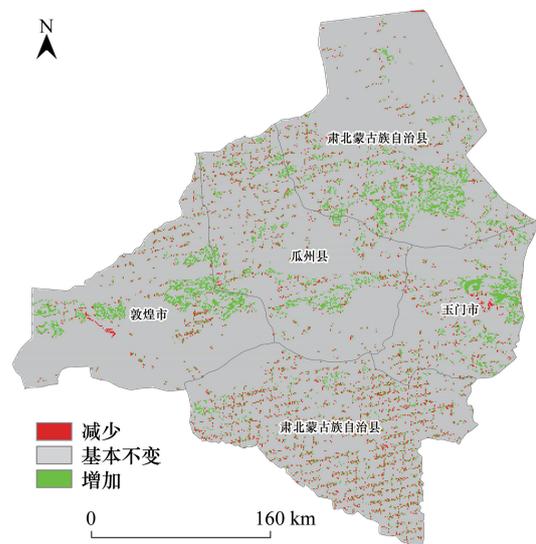


图 9 2015—2040 疏勒河流域碳储空间变化

Fig.9 Spatial changes of carbon storage in the Shule river basin from 2015 to 2040

4 讨论

4.1 碳储量时空变化及其影响因素

本研究表明,1990—2015 年疏勒河流域碳储量呈现逐年增加的趋势,一定程度上反映了疏勒河流域生态系统服务功能有所提高,通过模拟和预测 2040 年的土地利用类型空间分布和碳储量功能,发现未来流域内碳储量持续提高,生态系统服务功能不断增强。与部分学者研究结果一直,李曼等^[42]研究表明 1985—2010 年疏勒河流域生态系统服务价值呈增加趋势,且发现草地贡献了最大的生态系统服务功能增加值。孙晓芳等^[43]在全球尺度的模拟研究结果也表明生态系统碳储量呈增加趋势。在模型设定中,碳密度无年际变化,因此碳储量的变化主要是由于区域内不同土地利用类型的相互转化而导致,由于流域内人口增加和经济发展而导致的开垦荒地以及退耕还林等政策的实施在一定程度上增加了植被覆盖率,大面积低碳密度的未利用地向高碳密度的草地、林地等地转移,由此使得生态系统碳储量增加,草地为主要碳库。由此可见,诸如退耕还林等生态措施可以提高生态系统碳储量,而 Zhao 等^[44]利用 CA-Markov 和 InVEST 模拟也发现积极的人类生态工程措施可以提高生态系统碳储量。本研究结果表明建设用地扩张会导致生态系统碳储量减少,与 Jiang 等^[45]和 He 等^[46]研究结果同样表明城镇化会导致生态系统碳储量减少。同样在干旱区,徐自为等^[47]在新疆尉犁县的研究发现生态系统碳储量有减少趋势,而导致碳储量减少的主要原因是建设用地扩张占用了耕地、林地和草地等。

4.2 不确定性分析

InVEST 模型计算碳储量时也有一些不确定性因素。首先,模型基于大尺度的土地利用类型变化计算碳储量及其时空变化,但对碳固持存在重要影响的光合速率和土壤微生物活动等诸多因素未考虑;其次,模型中,碳密度无年际变化,这样的情况下,碳储量的变化就是由土地利用类型的转化而引起;最后,土地利用变化的数据多基于遥感技术的使用,虽然遥感技术日益走向成熟,但在遥感影像解译等过程中,由于操作人员主观因素的影响,土地利用分类的精度难以保证^[48]。除此之外,利用 CA-Markov 模型进行土地利用类型模拟时,由于数据获取较为困难,各种地类的转化的动因较少,对地类转化预测造成一定影响。

虽然 InVEST 模型和 CA-Markov 模型有一定的不确定性,但是其运算结果能清晰反映和预测疏勒河流域

1990—2040 年来的碳储量时空变化,碳储量作为生态系统服务功能的一个重要指标,在一定程度上反映区域生态系统服务功能的好坏。因此,在以后的研究中,还需加强以下 3 个方面的工作:第一,加强各土地利用类型碳密度监测,提高土地利用分类的空间分辨率。InVEST 模型中碳储存模块只考虑了不同地类的碳密度,而未考虑到不同地类的空间异质性,评估结果只会随着地类变化而变化,因此今后的研究中应该加强对碳密度的实地的连续监测;土地利用类型的分类应该采用高分辨率影像作为基础数据,综合提高碳储量评估的精度。第二、本文中仅对未来土地利用类型作了一种预测,预测方向偏向于自然发展下的数量预测,而忽略了地方政府在社会经济政策和土地利用规划政策上对未来土地利用变化的约束和干预^[49],因此在未来研究中,应当利用更多自然和社会经济条件,结合流域内的发展政策,对流域内不同情境下的土地利用类型进行模拟和预测,以期能提高科学的预见性与决策的合理性。第三、加强多领域跨学科研究,注重碳质量的研究^[50],为提高生态系统服务提供科学依据;建立土地利用变化与生态系统耦合模型,优化不同土地利用类型下碳循环模型,厘清土地利用变化对于陆地生态系统碳储量的影响机制,在分清不同的碳循环过程这一重要基础上,对已有模型予以完善,综合考虑环境、生化及人为因素等的影响,建立土地利用变化与生态系统相耦合的模型。

5 结论

(1) 1990、1995、2000、2005、2010、2015 年疏勒河流域碳储量分别为 7.994×10^8 、 7.996×10^8 、 7.998×10^8 、 8.038×10^8 、 8.064×10^8 、 8.071×10^8 t, 呈现逐年增加趋势,总体增加了 7.7×10^6 t, 年均增加 0.038%。

疏勒河流域碳储量存在显著的空间分布特征,碳储量较高的地区主要为疏勒河两岸和肃北;碳储量与土地利用类型变化有显著相关性,与耕地、草地、建设用地呈正相关性,与林地和未利用地呈的负相关性。

(3) 2040 年,疏勒河流域碳储量为 9.128×10^8 t, 比 2015 年增加了 1.057×10^8 t, 增加的地区主要出现在肃北(北)、流域中部绿洲河流两岸,主要是因为植被面积的增加,提高了土壤和地下生物碳储量,使得整个流域的碳储量增加。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [2] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus B*, 2003, 55(2): 378-390.
- [3] He C Y, Zhang D, Huang Q X, Zhao Y Y. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 44-58.
- [4] 方精云,于贵瑞,任小波,刘国华,赵新全.中国陆地生态系统固碳效应-中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 848-857.
- [5] Vizcaino-Bravo Q, Williams-Linera G, Asbjornsen H. Biodiversity and carbon storage are correlated along a land use intensity gradient in a tropical montane forest watershed, Mexico. *Basic and Applied Ecology*, 2020, 44: 24-34.
- [6] De Fries R S, Field C B, Fung I, Collatz G J, Bounoua L. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(3): 803-815.
- [7] Houghton R A. Counting terrestrial sources and sinks of carbon. *Climatic Change*, 2001, 48(4): 525-534.
- [8] Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K, Griffin R, Guannel G, Guerry A, Johnson J, Hamel P, Kennedy C, Kim C, K, Lacayo M, Lonsdorf E, Mandle L, Rogers L, Silver J, Toft J, Verutes G, Vogl A, L, Wood S and Wyatt K. InVEST 3.8.9. post11 + ug, g0bd03e2 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund. 2020.
- [9] 侯红艳,戴尔阜,张明庆. InVEST 模型应用研究进展. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 39(4): 62-67.
- [10] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, Lei X, Chen Z. 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*, 2017, 345: 30-40.
- [11] 张影,谢余初,齐姗姗,巩杰,张玲玲. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征. *资源科学*, 2016, 38(8): 1585-1593.
- [12] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-639.
- [13] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales.

- Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.
- [14] Firozjaei M K, Sedighi A, Argany M, Jelokhani-Niaraki M, Arsanjani J J. A geographical direction-based approach for capturing the local variation of urban expansion in the application of CA-Markov model. *Cities*, 2019, 93: 120-135.
- [15] Rimal B, Keshitkar H, Sharma R, Stork N, Rijal S, Kunwar R. Simulating urban expansion in a rapidly changing landscape in eastern Tarai, Nepal. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(4): 255.
- [16] Gaglio M, Aschonitis V, Pieretti L, Santos L, Gissi E, Castaldelli G, Fano E A. Modelling past, present and future Ecosystem Services supply in a protected floodplain under land use and climate changes. *Ecological Modelling*, 2019, 403: 23-34.
- [17] 黄康, 戴文远, 黄万里, 欧惠, 胡航箫. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用变化对生境影响评价——以福建省福州新区为例. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 155-162.
- [18] 巩杰, 钱彩云, 钱大文. 1977—2013 年疏勒河中下游土地利用变化与环境响应. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 775-781.
- [19] 傅伯杰, 刘国华, 欧阳志云. 中国生态区划研究. 北京: 科学出版社, 2013: 137-139.
- [20] 齐敬辉. 疏勒河流域绿洲生态演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [21] 齐敬辉. 疏勒河中下游 LUCC 特征及驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [22] Yulianto F, Maulana T, Khomarudin M R. Analysis of the dynamics of land use change and its prediction based on the integration of remotely sensed data and CA-Markov model, in the upstream Citarum Watershed, West Java, Indonesia. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(10): 1151-1176.
- [23] Karimi H, Jafarnejhad J, Khaledi J, Ahmadi A. Monitoring and prediction of land use/land cover changes using CA-Markov model: a case study of Ravansar County in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(19): 592.
- [24] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [25] 薛卓彬. 基于 InVEST 模型的延河流域生态系统服务功能评估[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [26] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 蔺琛, 康峰峰, 曹文强, 马志波, 李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 100-104.
- [27] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [28] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(1): 72-80.
- [29] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.
- [30] 程积民, 程杰, 杨晓梅, 刘伟, 陈芙蓉. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征. *生态学报*, 2012, 32(1): 226-237.
- [31] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.
- [32] 奚小环, 张建新, 廖启林, 陈德友, 白荣杰, 黄增芳. 多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题——以江苏、湖南、四川、吉林、内蒙古为例. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 58-67.
- [33] 瓜州县志编纂工作委员会. 瓜州县志. 兰州: 甘肃文化出版社, 2010.
- [34] 赵玉海. 玉门市志. 北京: 现代出版社, 2011.
- [35] 张潜, 张涛, 肖永康, 魏群, 张志良. 甘肃疏勒河流域移民迁入区生态环境的演变趋势分析. *干旱区资源与环境*, 1997, 11(3): 34-41.
- [36] Eswaran H, van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [37] Smith P. Soils as carbon sinks: the global context. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 212-218.
- [38] 水利部综合事业局, 甘肃省水文水资源局, 河海大学. 疏勒河灌区地下水演变规律及评价方法. 郑州: 黄河水利出版社, 2016: 87-87.
- [39] Bayen P, Noulèkoun F, Bognounou F, Lykke A M, Djomo A, Lamers J P A, Thiombiano A. Models for estimating aboveground biomass of four dryland woody species in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Arid Environments*, 2020, 180: 104205.
- [40] 彭玺, 张亚威. 湘乡市林地森林碳储量及碳密度研究. *中南林业调查规划*, 2019, 38(1): 62-67.
- [41] Tao Y, Li F, Wang R S, Zhao D. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: a study from Changzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 651-657.
- [42] 李曼, 张洁, 李园园. 1985—2010 年疏勒河流域生态系统服务价值评估. *山西师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 33(3): 56-61.
- [43] 孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟, 张昊. 全球植被碳储量的时空格局动态. *资源科学*, 2013, 35(4): 782-791.
- [44] Zhao M M, He Z B, Du J, Chen L F P, Lin P F, Fang S. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 29-38.
- [45] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, Lei X, Chen Z. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CA-Markov and the InVEST models. *Ecological Modelling*, 2016, 345: 30-40.
- [46] He C Y, Zhang D, Huang Q X, Zhao Y Y. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSUrban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 44-58.
- [47] 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. *环境科学研究*, 2018, 31(11): 1909-1917.
- [48] 王军德, 程玉菲, 金彦兆. 移民安置综合开发区土地利用变化及驱动力分析——以疏勒河中游干流区为例. *水利水电技术*, 2018, 49(10): 46-51.
- [49] 周锐, 苏海龙, 王新军, 李月辉, 胡远满, 许博涵. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测——以江苏省常熟市辛庄镇为例. *资源科学*, 2011, 33(12): 2262-2270.
- [50] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 陈光水, 李旭. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响. *地理学报*, 2007, 62(11): 1123-1131.