

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0047

ZENG Panru, ZHANG Fuping, FENG Qi, et al. Estimation of the carbon sequestration value and spatial and temporal evolution of different vegetation ecosystems in Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6):1348-1358. [曾攀儒, 张福平, 冯起, 等. 祁连山地区不同植被生态系统固碳价值量估算及时空演变分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6):1348-1358.]

祁连山地区不同植被生态系统固碳价值量估算 及时空演变分析

曾攀儒^{1,2}, 张福平^{1,2}, 冯起³, 魏永芬⁴, 黄良红⁵, 李玲^{1,2}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119; 2. 陕西省旅游信息科学重点实验室, 陕西 西安 710019;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 4. 日本国立岐阜大学流域圈科学研究中心,

日本 岐阜 501-1193; 5. 民航山西空管分局, 山西 太原 030031)

摘 要: 基于改进的CASA模型测算祁连山地区植被净初级生产力(NPP)物质质量, 并进一步基于光合作用方程式、碳循环过程模型估算了研究区2005年、2010年、2015年植被、土壤固碳量及价值, 旨在定量分析该区域不同植被生态系统植被、土壤固碳价值时空演变情况, 为制定更科学合理的碳管理措施提供科学依据。研究表明: 祁连山地区2005-2015年植被、土壤固碳价值呈递增趋势, 2005年、2010年、2015年植被、土壤固碳价值分别为515.95、356.56亿元; 491.05、404.36亿元; 581.55、465.65亿元, 土地类型的改变使得植被、土壤固碳分别增长12.72%、30.39%。从空间分布上看, 东部植被、土壤固碳量明显高于西部, 林地固碳能力最高, 单位面积固碳量为 $10.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。草地是研究区分布最广的植被, 且其对该地区植被、土壤固碳贡献比为51.13%、49.34%。

关键词: NPP估算; 祁连山地区; 固碳价值量; 光合作用; 土壤基础呼吸

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2019)06-1348-11

0 引言

随着工业化发展, 化石燃料使用量增长, 温室气体浓度增长, 全球气候变暖问题变得日益严峻。其中 CO_2 这一温室气体的作用最为显著, 其排放总量约占温室气体排放总量的77%^[1]。为减缓温室效应, 新能源及固碳技术的研发是目前较通用解决办法。其中, 固碳方法主要分为人工及自然两大类, 相比于对生态系统平衡存在影响的人工固碳法, 自然固碳法更为安全有效^[2]。自然固碳法包括森林、草地、耕地生态系统固碳, 各生态系统固碳又可分为植被与土壤固碳, 通过植物光合作用, 空气中的 CO_2 被固定于植被中, 当动植物凋落、腐败后其自身所存贮碳将进入土壤^[3], 土壤作为陆地生态系统

中最大的碳库, 其储存了超过80%的碳^[4-5]。通过对植被与土壤碳储量进行准确估算, 能为制定更科学合理的碳管理措施提供科学依据^[6]。对其生态价值进行量化将进一步提升研究者及管理者对植被生态系统固碳价值的直观认知, 也是当前生态学与生态经济学研究的热点问题之一^[1]。植被净初级生产力能够反映植被对大气中 CO_2 的固定能力, 其中以植被光合作用机理为理论基础的CASA模型以其计算效率高, 输入参数少等优点广泛应用于区域及全球尺度的NPP估算^[7]。其针对中国陆地生态系统的估算应用较广, 可信度较高, 在干旱及半干旱地区同样具有较强适用性。魏靖琼等^[8]利用CASA模型对甘肃省草地NPP进行了估算, 发现草地NPP季节变化明显, 夏季达最大值为 $790.56 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 张

收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2018JM4020); 国家重点研发计划项目(2017YFC0404300); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC031)资助

作者简介: 曾攀儒(1995-), 女, 四川眉山人, 2017年在西华师范大学获学士学位, 现为陕西师范大学在读硕士研究生, 从事资源环境遥感研究. E-mail: 934753112@qq.com

通信作者: 张福平, E-mail: Zhang_fuping@163.com.

禹舜等^[9]利用CASA模型分析了祁连山NPP对气候因子的响应情况。有关土壤有机碳含量的测算方法主要分为直接及间接测算法,直接测算法相对精确但空间分辨率不高且时空动态分析较困难,间接估算法估算精确性有待提高,但针对区域及时空演变情况效率较高^[10],如CENTURY模型、DNDC模型等,但这类模型对数据输入要求较高,数据获取较为困难。

因此,本文选用直接估算法与基于遥感的碳循环过程模型的间接估算法相结合的方式对区域土壤碳储量进行估算及时空分析,既满足一定精度要求、数据获取也相对较容易。此方法目前应用较广,有关不同空间尺度植被生态系统均有相应研究成果,且研究结果精度 R^2 可达60%~80%不等^[11-12],可信度较高。

祁连山作为我国200 mm年等降水量线及我国干旱区与非干旱区分界线,其地理意义不言而喻,它既是我国西部重要生态屏障,我国重要的水源涵养生态功能区,也是我国生物多样性保护优先区域,被誉为河西走廊“生命线”和“母亲山”^[13-14]。但针对该区域固碳价值研究较少,且已有研究多以单一植被生态系统作为研究对象,而针对区域不同植被生态系统植被与土壤固碳价值情况鲜见报道,因此本文综合前人研究成果并结合植被生产力及光合作用过程、碳循环过程模型对祁连山地区2005年、2010年、2015年不同生态系统植被、土壤固碳量进行了定量计算并估算了其经济价值,旨在进一步为相关部门提供研究区近年来由于土地利用变化造成的植被、土壤固碳情况及价值变化并期望能为区域的生态保护提供科学、直观的参考依据。

1 研究区概况

祁连山(93°30′~103°00′ E, 35°43′~39°36′ N)地处于内蒙古高原、黄土高原、青藏高原三大高原交汇带,是疏勒河、黑河、石羊河三大水系56条内陆河的主要水源涵养地和集水区^[15]。横跨甘肃、青海两省,东西长约1 000 km,南北宽约300 km,总面积约 $18.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔为1 642~5 791 m。区域内年总降水量为300~500 mm,年平均气温为0.6℃,年蒸发量在1 600~1 800 mm左右,大部分地区在海拔在3 500~5 000 m之间^[16],见图1。地势由东南向西北逐渐减小^[17]。植被类型有森林、灌丛、草原、荒漠、草甸、沼泽和水生植被、高寒垫状植被、高寒流石坡稀

疏植被等。主要土壤类型为灰钙土、栗钙土、黑土、灰褐土、草甸土、寒漠土、荒漠土、棕钙土等。

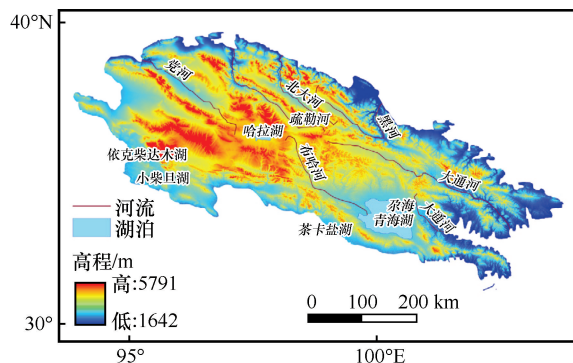


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Map showing the Qilian Mountains

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)^[18-20],时间选取2005年、2010年、2015年,DEM数据来自地理空间数据云的ASTGTM数据,空间分辨率为30 m,Modis-NDVI数据集来自美国太空总署(NASA)的16日合成数据,蒸散发数据来源于美国太空总署(NASA)的8日合成数据,空间分辨率为500 m,时间为2005年、2010年、2015年。气象数据来源于中国气象科学数据共享网,选取2005年、2010年、2015年研究区及其周边完整且均匀分布的气象站点的月值的气温、降水及日照辐射数据资料。土壤碳储量相关数据来源于第二次全国土地调查中国科学院南京土壤所提供的1:100万土壤数据。

2.2 研究方法

2.2.1 植被净初级生产力(NPP)遥感估算模型

NPP作为地表碳循环的重要组成部分,不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力,表征陆地生态系统的质量状况,而且是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子,在全球变化及碳平衡中扮演着重要的作用^[21]。用于估算NPP的模型较多,如:气候相关统计模型、生态系统过程模型、生态遥感耦合模型、光能利用率模型。本文选取光能利用率模型中的改进CASA模型对研究区进行NPP估算,该模型适用于区域及全球尺度上的NPP估算,是国际上较为常用的大尺度NPP估算模型,国内外学者基于CASA模型开展了大量的研究工作,并获得了较好的估算结果。有关研究成果

表明 CASA 模型适用于祁连山草地 NPP 研究^[22], 本文在结合朱文泉等^[21]、冯益明等^[23]改进后的 CASA 模型研究成果上对研究区进行了 NPP 估算, 研究表明改进的 CASA 模型适用于干旱区生态系统, 模型精度达 80% 以上。具体模型如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中: $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mon}^{-1}$); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率 ($\text{g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中: $SOL(x, t)$ 表示 t 月在像元 x 处的太阳总辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mon}^{-1}$); $FPAR(x, t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例; 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

$$FPAR(x, t) = \alpha FPAR_{NDVI} + (1 - \alpha) FPAR_{SR} \quad (3)$$

$$FPAR_{NDVI}(x, t) = \frac{(NDVI(x, t) - NDVI_{i, \min})}{(NDVI_{i, \max} - NDVI_{i, \min})} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (4)$$

$$FPAR_{SR}(x, t) = \frac{SR(x, t) - SR_{i, \min}}{(SR_{i, \max} - SR_{i, \min})} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (5)$$

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \quad (6)$$

式中: $FPAR_{\min}$ 和 $FPAR_{\max}$ 的取值与植被类型无关, 分别为 0.001 和 0.95; $SR_{i, \max}$ 和 $SR_{i, \min}$ 分别对应第 i 种植被类型 $NDVI$ 的 95% 和 5% 下侧百分位数; α 取 0.5。

$$\varepsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (7)$$

式中: $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用; $W_e(x, t)$ 为水分胁迫影响系数, 反映水分条件的影响; ε_{\max} 是理想条件下的最大光能利用率 ($\text{g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

$$T_{e1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \quad (8)$$

$$T_{e2}(x, t) = 1.184 / \{1 + \exp[0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x, t))]\} \times 1 / \{1 + \exp[0.3 \times (-T_{opt}(x) - 10 + T(x, t))]\} \quad (9)$$

$$W_e(x, t) = 0.5 + 0.5 \times E(x, t) / E_p(x, t) \quad (10)$$

式中: $T_{opt}(x)$ 为植物生长的最适温度, 定义为某一区域一年内 $NDVI$ 值达到最高时的当月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); $E(x, t)$ 为区域实际蒸散量 (mm); $E_p(x, t)$ 为区域潜在蒸散量 (mm)。

2.2.2 土壤基础呼吸反演

土壤呼吸即未扰动土壤中产生 CO_2 的所有代谢作用, 包括自养呼吸和异养呼吸, 土壤基础呼吸即为异养呼吸^[12]。土壤基础呼吸由于剔除了温度和水分的影响, 从而使其与土壤有机碳的关系非常密

切, 其测定系数 R^2 可达 0.78^[10]。本文选用周涛等^[10]改进的碳循环过程模型反演土壤基础呼吸, 进而建立土壤中 SOC 与 CO_2 排放的关系模型。王燕等^[24]研究表明采用此法构建的估算模型在半干旱区精度可达 77.87%, SOCD(土壤有机碳密度)实测值与估测值的 R^2 达到 0.86, 可见此法适用于半干旱区土壤有机碳密度估算。因此, 本文采用此法对研究区土壤基础呼吸进行反演。具体公式如下:

$$A_{ij} = \frac{R_H}{\exp(b \times T) \times y} \quad (11)$$

$$y = \frac{1}{1 + 30.0 \times \exp(-8.5 \times x)} \quad (12)$$

$$x = \frac{PPT}{PET} \quad (13)$$

$$R_H = NPP \quad (14)$$

即

$$A_{ij} = \frac{NPP}{\exp(b \times T) \times y} \quad (15)$$

式中: A_{ij} 为土壤基础呼吸; PPT 为年降水量; PET 为年潜在蒸散量; b 为温度敏感常数因子, 取值 0.0306^[25]。

2.2.3 土壤总碳量计算

$$C_j = 0.58 \times S_j \times H_j \times O_j \times W_j \quad (16)$$

式中: j 为土壤类型; C_j 为第 j 种土壤类型的碳储量 (t); S_j 为第 j 种土壤类型分布面积 (hm^2); H_j 为第 j 种土壤类型的平均厚度 (cm); O_j 为第 j 种土壤类型的平均有机质含量 (%); W_j 为第 j 种土壤类型的平均容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)^[26]。

2.2.4 固碳价值测评模型

植物进行光合作用的同时吸收 CO_2 、释放 O_2 和生成有机物质。其化学反应方程式为 $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ 。该测算以植被 NPP 物质质量为依据, 运用光合作用方程, 生产 1 kg 有机物能固定 1.63 kg 的 CO_2 ^[1], 从而得出固碳物质质量。目前国际上核算植被固碳价值比较有代表性的方法主要有碳税法、造林成本法、人工固定法和避免损害费用法等^[27], 其中, 造林成本法因其方法简明, 能直接反映商品价值^[28], 被广泛应用于固碳价值研究中, 因此, 本文通过造林成本法估算固定二氧化碳的价值量。由于 1990 年的平均造林成本为 260.9 元 $\cdot \text{t}^{-1}$ ^[29], 利用贴现率公式计算, 如今造林成本应为 739.31 元^[30]。

土壤固碳价值估算常用方法有: 市场价值法、碳税法与造林成本法。为使估算结果更合理, 利用碳税法与造林成本法均值进行固碳价值评估。取

值为 $834.15 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1[30]}$ 。具体土壤碳储量价值计算公式如下：

$$Y = 834.15 \times \sum_{i=1}^n W_s \quad (17)$$

式中： Y 为固碳价值(元)； W_s 为土壤碳储量； i 为群落类型。

3 结果与分析

3.1 研究区主要土地利用类型变化特征

由表1可以看出,11年间研究区土地类型除其他地类(包括水体、建设用地、未利用地)有所减少,耕地、林地、草地都有所增加,其中增加最多,增长最快的是耕地,其增长率为0.98%。其中,2005–2010年耕地、林地、草地呈增加趋势,2010–2015年耕地、林地、草地有所减少;其他地类一直呈先下降再上升趋势。总体而言2005–2015年研究区其他地类土地占比最大,2005年、2010年、2015年分别占研究区土地总面积的41.01%、40.93%、40.88%。目前,如何合理开发利用其他地类是尚待解决的问题。通过表2不难看出,草地对耕地、林地、其他地类贡献最大,贡献比分别为23.8%、25.2%、15.1%。其他地类对草地贡献最大为16%。可见,该研究区中草地的变化对不同土地利用类型变化影响较大。

3.2 精度评价

3.2.1 NPP估算结果精度验证

对NPP的验证可采用实测或者相对验证法两种,由于研究区范围较大且植被类型复杂,短时

表1 祁连山地区不同土地类型面积变化及转移情况

Table 1 Area change and transfer of different land use

types in Qilian Mountains

土地利用类型	土地面积/($\times 10^4 \text{ hm}^2$)			11年间土地增长率/%
	2005年	2010年	2015年	
耕地	62.41	63.71	63.02	0.98
林地	165.04	165.51	165.30	0.16
草地	837.26	839.05	837.38	0.01
其他	878.79	878.64	877.76	-0.12

表2 土地利用类型转移矩阵(%)

Table 2 Land use types transfer matrices

土地利用类型	耕地	林地	草地	其他
耕地	67.8	1.5	1.8	0.1
林地	4.4	67.6	5.0	1.0
草地	23.8	25.2	77.3	15.1
其他	3.9	5.7	16.0	83.8

间内NPP实测值较难获取,故本文采用与MOD17A3产品和前人研究成果相比较的方法。MOD17A3产品已经被验证适用于区域和全球尺度的NPP研究^[18–19],也有很多学者将产品与估算值进行比较来判断估算值的可靠性。本文通过将两者随机抽样比较,结果如图2。可以看出,NPP估算值与MOD17A3产品相关性较高,2005年、2010年、2015年 R^2 ($P < 0.01$)分别为0.795、0.793、0.735。

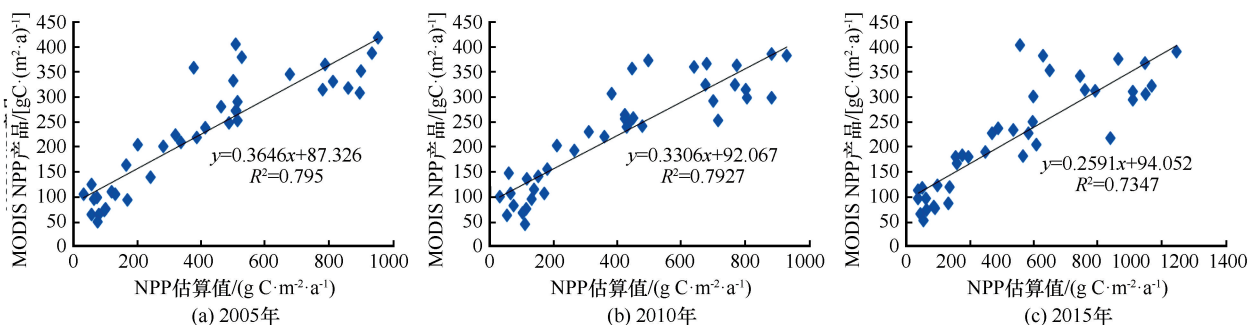


图2 模拟值与MODIS产品对比

Fig. 2 Relations between simulated NPP and MODIS NPP product in 2005 (a), 2010 (b) and 2015 (c)

与MOD17A3产品相比,本文模拟值相对偏高,原因是本文采用ANUSPLINE插值方法^[35]进行气象因子插值,此法相比于其他插值方法如克里金、反距离权重插值法等考虑了地形因子对插值结果的影响,本文研究区域地形起伏较大,因此采用

此法插值结果更为合理。且本文采用的改进CASA模型是更适用于本区域的,相较于CASA模型采用同一参考值对不同植被类型进行计算,本文参数取值更为合理,且有研究表明MOD17A3产品存在值偏低情况^[36–37]。本文将模拟值与前人研究进行对

比,如表3所示,可见,本文研究值较于以往研究 相差不大,本研究具有较好可信度。

表3 祁连山地区年均NPP与文献值比较(g C·m⁻²·a⁻¹)
Table 3 Comparison of annual average NPP and literature values in Qilian Mountains (g C·m⁻²·a⁻¹)

土地利用类型	模拟平均值	文献中实测及模拟值				
		姜焱 ^[17] 、李肖娟 ^[22]	刘亚荣 ^[31]	赵国帅 ^[32]	焦伟等 ^[33]	Pan 等 ^[34]
耕地	517.86	—	590.1	276	415.6	746.1
林地	625.41	334.48	400~601	300~700	496.7	686.7
草地	279.12	283.41	260~330	100~300	252.2	233~437
其他	80.05	—	—	86	51.1	56.3

3.2.2 土壤有机碳密度反演结果验证

通过野外采样及室内实验,对研究区基于模型反演的土壤有机碳密度结果进行验证。得到模拟值与实测值 R^2 为0.548,标准误差(RMSE)为6.45,如图3所示,表明模拟精度较高,有较好可信度。除此之外,本文还将模拟结果与前人研究成果进行了对比。表4为对比结果,发现本文估算结果总体趋势与前人研究相同,具体数值上相较偏高,分析造成此现象的原因为祁连山土壤类型复杂多变,共包括10个土纲,53个亚类,目前本文获取到的土壤数据为1:100万精度数据,将其与500 m分辨率遥感数据结合反演必然存在偏差,且实地测量数据有限,未能在研究区全域展开不同土类测定,故与前人研究相比存在模拟值偏高情况,今后将继续深入,加强对该地的实测数据的获取,使用精度更高

数据进行反演,进一步提升估算精度。但总体来说,估算结果仍在可接受范围内,较为可信。

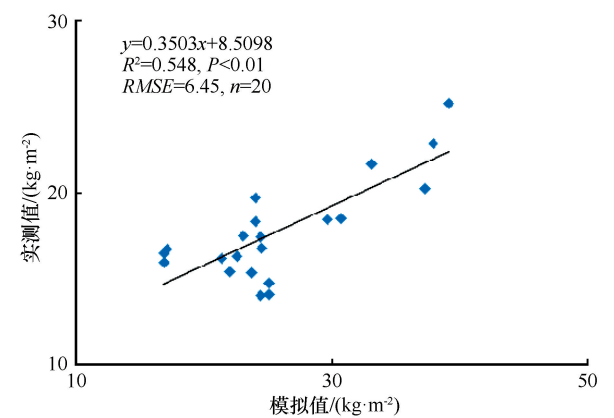


图3 有机碳密度模拟值与观测值比较
Fig. 3 Relation of simulated and measured organic carbon density

表4 祁连山地区SOCD模拟值与文献值比较(kg·m⁻²)
Table 4 Comparison of modeled SOCD and literature values in Qilian Mountains

土地利用类型	模拟平均值	文献中实测及统计模拟值				
		常宗强等 ^[38]	王合领 ^[39]	胡启威等 ^[40] 、李硕等 ^[41]	朱猛等 ^[42]	徐丽等 ^[6]
耕地	42.49	10.63	—	—	—	7.57~10.84
林地	54.42	15.96~19.95	32.42	14.16~24.12	33.64	10.5~19.36
草地	28.86	17.74	40.42	3.34~6.91	10.52~17.72	7.96~13.16
其他	14.98	—	9.33	—	—	2.52~5.09

3.3 研究区不同土地利用类型植被净初级生产力分析

绿色植被通过光合作用,对调节区域气候,改善生态环境具有重要意义。本研究基于遥感数据的光能利用率模型,计算了祁连山地区2005年、2010年和2015年不同植被生态系统NPP物质质量。根据植被类型的特点,将土地利用类型分为四大类:耕地、林地、草地、其他。结合朱文泉等^[21]、冯益明等^[23]研究成果采用改进CASA模型计算不同植被类型NPP,最后求得2005年、2010年、2015年研

究区NPP总物质量,具体结果见表5和图4。从不同植被类型NPP均值来看,林地、耕地较高,草地次之,其他地类最低。从空间分布来看(图4),研究区东部NPP物质质量明显高于西部地区,此分布情况与研究区土地利用类型分布情况相对应,研究区东部整体生态系统状况优于西部,物种更丰富,植被覆盖度明显高于西部地区,且林地、耕地多分布于研究区东部。单位面积固碳量最低的三县都位于研究区西部,固碳量前三县(民和回族土族自治县、大通回族土族自治县、湟源县)

表 5 祁连山地区不同土地利用类型 NPP 均值及总量						
Table 5 Annual mean and total NPP values of various land use types in Qilian Mountains in 2005, 2010 and 2015						
土地利用类型	2005 年		2010 年		2015 年	
	NPP 均值/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 总量/ ($\times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 均值/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 总量/ ($\times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 均值/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 总量/ ($\times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)
耕地	5.09	317.52	4.83	307.42	5.62	354.36
林地	6.13	1 012.16	5.67	938.49	6.96	1 150.35
草地	2.73	2 285.44	2.58	2 166.54	3.06	2 563.96
其他	0.77	673.93	0.76	669.64	0.87	765.74
总量		4 289.05		4 082.10		4 834.41

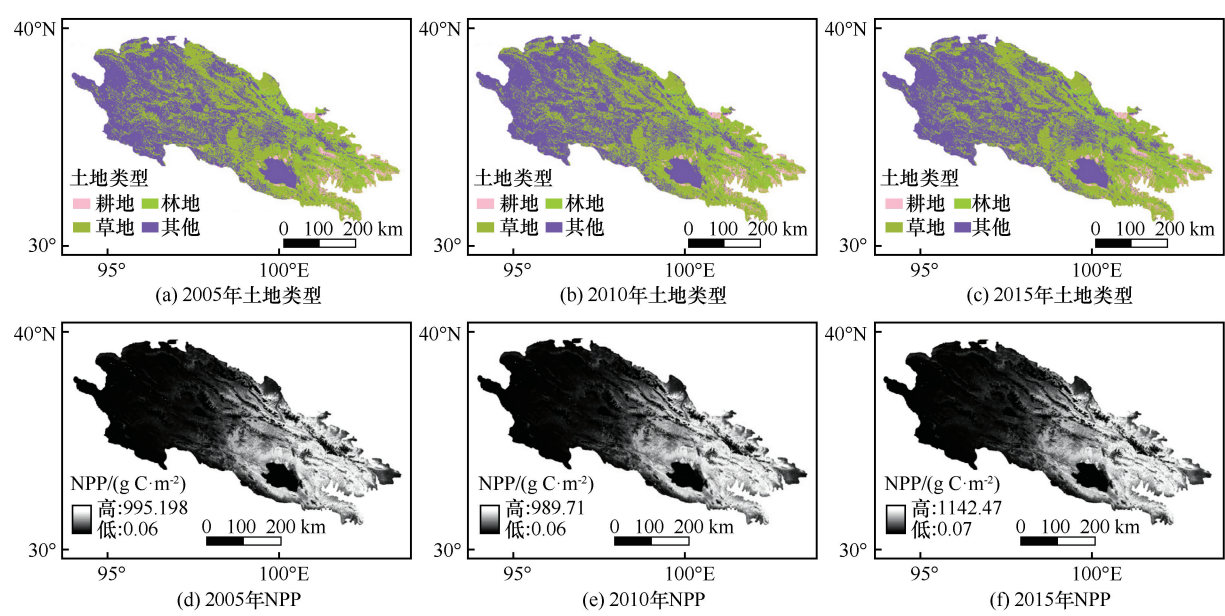


图 4 研究区 11 年间土地利用及单位面积 NPP 变化情况

Fig. 4 Maps showing the land use types and per unit area NPP in Qilian Mountains in 2005, 2010 and 2015

都位于东部，且有较高的森林覆盖率，草地分布广。从 NPP 总量来看，2005 年、2010 年、2015 年 NPP 总量分别为 $4\,289.05\times 10^4 \text{ t}$ 、 $4\,082.1\times 10^4 \text{ t}$ 、 $4\,834.41\times 10^4 \text{ t}$ ，总体呈上升趋势。由于研究区内草地为主要植被类型，与之相应，2005 – 2015 年草地所生产的 NPP 物质质量明显高于其他地类。

3.4 祁连山地区植被固碳物质质量分析及价值量评测

通过光合利用方程式得到研究区植被固碳物质质量，此法也是目前计算植被固碳情况常用方法，如张翀等^[43]、张静等^[1]分别采用此法对陕北地区、汾河中下游地区土地生态系统固碳释氧进行价值评价，具体结果如表 6。

由表 6 可知，2005 – 2015 年祁连山地区植被固碳量总趋势呈先减后增，与耕地、林地、草地这 3 种地类有较明显的一致性。研究区内植被固碳能力大小为林地 > 耕地 > 草地 > 其他；且林地与耕地

的固碳能力约为草地 2 倍。从固碳增长率来看，11 年间增长最大的为林地，其次为其他、草地、耕地。可见，研究区植被状况正逐渐改善，固碳情况也相应有所增加，这对减缓该地区温室效应状况无疑是有利的，纵然研究区林地、耕地固碳能力较高，但其所占面积不大，因此其对研究区总固碳量贡献有限，而草地固碳能力虽不如林地、耕地，但其面积占比大，对研究区总固碳量贡献最大，其他地类虽分布较广，但其植被稀疏，故其对总固碳量贡献不大。

通过采用造林成本法进一步估算出研究区植被固碳价值量，可知：2005 年、2010 年、2015 年祁连山地区总植被固碳价值分别为 515.95、491.05、581.55 亿元。由表 6 可知，2005 – 2015 年祁连山地区植被固碳价值量与 NPP 物质质量呈正相关。草地为研究区固碳价值贡献最大的地类，为研究区贡献一半以上固碳价值。可见，不同植被类型占比对研

表6 研究区各土地利用类型植被固碳量及价值估算

Table 6 Vegetation carbon sequestration and value estimation for various land use types in Qilian Mountains

in 2005, 2010 and 2015

土地利 用类型	2005年		2010年		2015年		11年间固碳 变化率/%
	植被固碳量/ ($\times 10^6$ t)	价值总量/ ($\times 10^8$ 元)	植被固碳量/ ($\times 10^6$ t)	价值总量/ ($\times 10^8$ 元)	植被固碳量/ ($\times 10^6$ t)	价值总量/ ($\times 10^8$ 元)	
耕地	5.18	38.20	5.01	36.98	5.78	42.63	11.60
林地	16.5	121.76	15.3	112.90	18.75	138.38	13.65
草地	37.25	274.92	35.31	260.62	41.79	308.43	12.19
其他	10.99	81.07	10.92	80.55	12.48	92.11	13.62
总计	69.91	515.95	66.54	491.05	78.80	581.55	12.72

究区固碳价值影响很大。

3.5 土壤呼吸与SOC的相关性及土壤固碳时空变化

通过将改进CASA模型计算结果与碳循环过程模型反演结合,得出各年土壤基础呼吸时空分布如图5所示,此法在国内应用较广,周涛等^[10]采用此法对中国土壤有机碳空间分布进行研究, R^2 达0.78。李婷等^[12]利用此法对关中-天水经济区土壤固碳价值量进行估算,并与实测值进行对比,标准误差(RMSE)达4.9726。李亚等^[11]采用此法进行福州市耕地有机碳动态变化研究, R^2 为0.705。因此,本文通过将2010年土壤基础呼吸计算结果与第二次全国土地调查土壤数据结合,随机采样44个点,将两者进行回归分析,结果如图5所示, R^2 为0.584,相关性较高。

从空间尺度上看(图6),SOC密度高值区主要分布在研究区东部,特别是天祝藏族自治县、互助土族自治县、肃南裕固族自治县的土壤有机碳密度处于高值。高值区分布情况与林地分布情况重合度高。不同土地利用类型的SOC密度排序为:林地>耕地>草地>其他。从时间尺度上看,研究区2005年、2010年、2015年土壤碳密度呈递增趋势,与前人研究有相似规律。说明该地区生态情况有

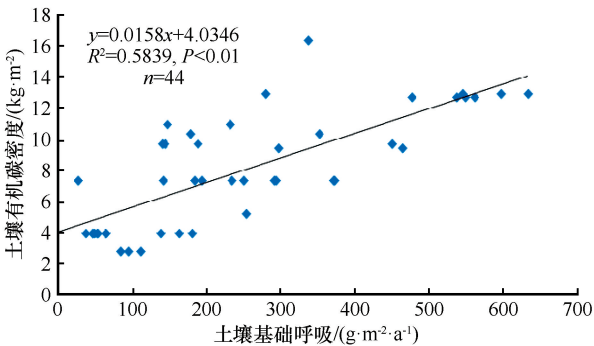


图5 土壤有机碳与土壤基础呼吸相关性分析

Fig. 5 Correlation between soil organic carbon and soil basic respiration

所改善,通过在该地设立国家级自然保护区,一定程度上减轻了人为对林地、草地的破坏,一系列退耕还林、围栏放牧措施相继出台实施,使得该地区相较之前植被状况有所好转,土壤固碳情况呈增加趋势,但仍值得注意的是土壤固碳进程缓慢,仍需加大力度保护生态,合理利用土地,合理耕作放牧。

3.6 土壤固碳价值估算

基于遥感数据结合碳循环过程模型估算出研究区土壤碳储量并通过碳税法与造林成本法相结合得到的研究区固碳价值估算结果如表7所示。由

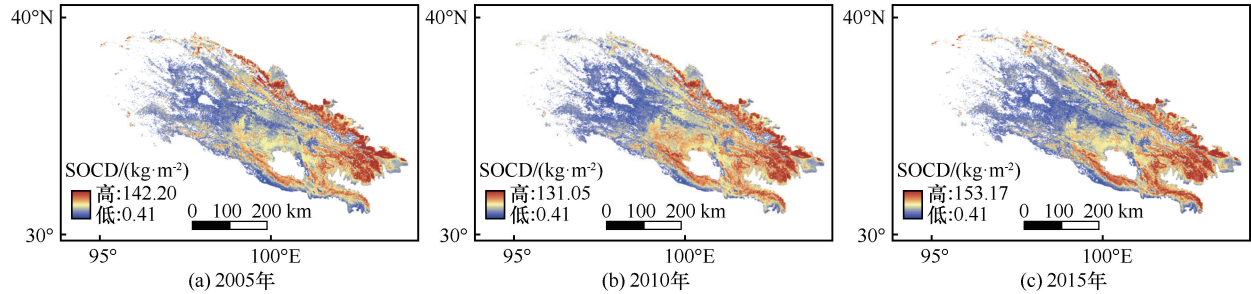


图6 研究区土壤有机碳密度分布情况

Fig. 6 Distribution of soil organic carbon density (SOCD) in Qilian Mountains in 2005, 2010 and 2015

表7可以看出,研究区11年来,土壤固碳量呈递增趋势的,此趋势与徐丽等^[6]研究结果相似。固碳价值与之一对应呈递增趋势。2005年、2010年、2015年固碳价值分别为356.56、404.36、465.65亿元。从不同土

地利用类型来看,固碳价值:草地>其他>林地>耕地。造成此结果的原因是研究区草地、其他类型土地占比较高,林地、耕地土地面积占比较低,总体来看草地对研究区土壤固碳贡献最大,耕地贡献最小。

表7 研究区各土地利用类型土壤固碳量及价值估算
Table 7 Soil carbon sequestration and value estimation for various land use types in Qilian Mountains in 2005, 2010 and 2015

土地利用类型	2005年		2010年		2015年	
	土壤固碳量/ ($\times 10^6$ t)	价值总量/ ($\times 10^8$ 元)	土壤固碳量/ ($\times 10^6$ t)	价值总量/ ($\times 10^8$ 元)	土壤固碳量/ ($\times 10^6$ t)	价值总量/ ($\times 10^8$ 元)
耕地	2.25	18.78	2.72	22.71	3.07	25.59
林地	7.68	64.07	8.88	74.10	10.42	86.93
草地	20.91	174.46	23.96	199.85	27.68	230.90
其他	11.90	99.25	12.91	107.70	14.65	122.24
总计	42.74	356.56	48.47	404.36	55.73	465.65

4 结论与讨论

4.1 讨论

本文通过改进的CASA模型、碳循环过程模型等结合遥感数据分别对祁连山地区2005年、2010年、2015年植被与土壤固碳量进行了估算。从植被固碳结果可看出,2005-2015年间,研究区植被NPP物质质量与固碳价值量呈下降后上升的趋势,这一结果与孙力炜^[44]、李肖娟^[22]对祁连山区植被年NPP估算结果趋势相同,土壤固碳呈递增趋势,与徐丽等^[6]研究趋势相似。草地对耕地、林地、其他地类贡献最大,面积贡献比分别为23.8%、25.2%、15.1%,其他地类对草地贡献最大,贡献比为16%,可见研究区草地年际变化明显,应加强对其管理利用。11年间,除其他地类下降了0.12%,其余地类呈增长趋势。其中,草地上升0.01%,耕、林地分别增长0.98%、0.16%,研究区植被与土壤固碳量分别增长12.72%、30.39%,对应固碳增长 8.89×10^6 t, 12.98×10^6 t,且耕地、林地、草地单位面积植被固碳量及土壤碳密度分别为其他地类的6.4倍、7.8倍、3.4倍和2.8倍、3.6倍、1.9倍,可见研究区植被、土壤固碳量对土地利用类型变化较敏感。

相对来说,草地在研究区内分布广泛,面积占比高达43.10%,其对研究区固碳量贡献最大,对植被、土壤贡献比分别达51.13%、49.34%,因此合理利用广袤草地资源,继续提升草地固碳将对该地区固碳情况带来更大程度改善。相关研究表明,围栏封育、建植人工草地、开垦草原后弃耕实现草

地植被自然恢复等措施有利于草地碳库积累,均是土壤质量得到改善的有效措施^[45]。研究区内林地覆盖面积不大,仅在局部地区发育形成斑块状森林植被,典型植被为落叶阔叶林和常绿针叶林,局部存在针阔混交林,原始林龄组比例失调,破坏后不易恢复^[46],但森林的固碳能力十分可观,其面积占比仅占8.5%,但对植被、土壤固碳贡献比分别为23.46%、18.33%,因此,进一步加大林地保护力度,进行生态防护林、经济林、景观林的构建,加大青海云杉、沙棘、金露梅等适宜该区域的植被种植力度。耕地固碳能力较林地稍弱,但仍有较大潜力,其面积占比仅占3.24%,但对植被、土壤固碳贡献比分别为7.42%、5.46%,有研究表明,祁连山农田地上残体碳储量为 $47.8 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,地下为 $106.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[47],因此,减少农田翻种有利于该地区碳积累。由于土质、环境等原因研究区内未利用地较多,植被固碳量少,其面积占比高达45.17%,但对植被、土壤固碳贡献比仅分别为15.99%、26.92%,因此如何通过技术改善提升未利用地植被覆盖度是值得进一步探寻的问题。

本文通过对研究区不同植被类型单位面积固碳量及总固碳量进行研究发现土地利用类型面积占比在较大程度上影响着植被及土壤固碳情况,因此,应加强对土地的合理利用,在人为引导下加强自然固碳能力,减缓温室效应。本文主要研究由于土地类型改变,植被覆盖的变化对研究区固碳的影响,而未对气候因子对其相关变化的影响做进一步分析,由于本文研究区并未以行政区划为单元进行划分,因此针对个别县域的分析是不完整的。针对

植被 NPP 的估算结果验证还应采用更精确的实测数据,这些不足将在今后研究中做进一步改进。

4.2 结论

通过以上分析,得到如下结论:

(1)2005—2015 年研究区内除其他类型地类呈减少趋势,其余呈增长趋势,草地对耕地、林地、其他地类的贡献最大,其他地类对草地贡献最大。研究区 2005 年、2010 年、2015 年的植被 NPP 总量分别为 $4\,289.05 \times 10^4$ 、 $4\,082.10 \times 10^4$ 、 $4\,834.41 \times 10^4$ t。11 年间植被固碳总价值增长率为 12.71%。

(2)研究区单位面积固碳量排序为:林地 > 耕地 > 草地 > 其他,土地利用类型面积排序:其他 > 草地 > 林地 > 耕地,且草地、其他地类面积约为耕地、林地的 8 倍和 14 倍。总固碳量贡献为:草地 > 林地 > 其他 > 耕地,不同地类面积对固碳量影响显著。东部物种多样性较丰富,西部荒漠化情况较严重,东部 62% 的土地所固定碳量仅占总固碳量的 37%。

(3)研究区 2005 年、2010 年、2015 土壤固碳价值为 356.56、404.36、465.65 亿元,呈递增趋势。11 年间研究区土地植被与土壤固碳趋势较为一致,各地类对土壤固碳价值贡献为:草地 > 林地 > 其他 > 耕地。与植被固碳相比,林地对土壤固碳作用相较于其他类别地类更为显著,草地在植被与土壤固碳方面都对研究区贡献最大。

参考文献(References):

- [1] Zhang Jing, Ren Zhiyuan, Zhang Jiaqi. Dynamic assessment of the values of CO₂ fixation and O₂ release in the middle and lower reaches of Fenhe River Basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 242–249. [张静,任志远,张嘉琪.汾河中下游土地生态系统固碳释氧动态测评[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):242–249.]
- [2] Chen Danyan, Yang Zhenchao, Kong Zheng. Comparative study and analysis of advantages and disadvantages of carbon sequestration methods[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2017, 45(3): 79–85. [陈丹艳,杨振超,孔政.固碳方法比较研究及利弊分析[J].北方农业学报,2017,45(3):79–85.]
- [3] Li Ting, Li Jin, Yang Huan. Estimate value of soil organic carbon based on remote sensing and process model in Guanzhong-Tianshui Economic Region[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(2): 451–459. [李婷,李晶,杨欢.基于遥感和碳循环过程模型的土壤固碳价值估算——以关中-天水经济区为例[J].干旱区地理,2016,39(2):451–459.]
- [4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156–159.
- [5] Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. Organic-carbon in soils of the world[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192–194.
- [6] Xu Li, Yu Guirui, He Nianpeng. Changes of soil organic car-

bon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2150–2167. [徐丽,于贵瑞,何念鹏.1980s–2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J].地理学报,2018,73(11):2150–2167.]

- [7] Zhang Meiling, Jiang Wenlan, Chen Quangong, et al. Research progress in the estimation models of grassland net primary productivity[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(2): 356–366. [张美玲,蒋文兰,陈全功,等.草地净第一性生产力估算模型研究进展[J].草地学报,2011,19(2):356–366.]
- [8] Wei Jingqiong, Liu Xiaoni. Estimation of grassland net primary productivity based on CASA model in Gansu Province[J]. *Grassland and Turf*, 2010, 32(4): 8–19. [魏靖琼,柳小妮.基于 CASA 模型的甘肃省草地净初级生产力研究[J].草原与草坪,2010,32(4):8–19.]
- [9] Zhang Yushun, Jia Wenxiong, Liu Yarong, et al. Response of net primary productivity to climatic factors in Qilian Mountains in recent eleven years[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(1): 77–85. [张禹舜,贾文雄,刘亚荣,等.近 11 年来祁连山净初级生产力对气候因子的响应[J].干旱区地理,2016,39(1):77–85.]
- [10] Zhou Tao, Shi Peijun, Luo Jinying, et al. Estimation of soil organic carbon based on remote sensing and process model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(1): 127–136. [周涛,史培军,罗巾英,等.基于遥感与碳循环过程模型估算土壤有机碳储量[J].遥感学报,2007,11(1):127–136.]
- [11] Li Ya, Zhang Liming, Chen Haoyue, et al. Estimation of changes in soil organic carbon in farmlands in Fuzhou City using Landsat vegetation data and 1:50000 soil database[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(4): 581–590. [李亚,张黎明,陈瀚阅,等.基于 Landsat 遥感影像和 1:50000 土壤数据库的福州市耕地有机碳动态变化研究[J].中国生态农业学报,2019,27(4):581–590.]
- [12] Li Ting, Li Jing, Wang Yanze, et al. The spatial flow and pattern optimization of carbon sequestration ecosystem service in Guanzhong-Tianshui Economical Region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3953–3969. [李婷,李晶,王彦泽,等.关中-天水经济区生态系统固碳服务空间流动及格局优化[J].中国农业科学,2017,50(20):3953–3969.]
- [13] Peng Shouzhong. Study on growth processes and ability of carbon sequestration of Qinghai spruce forest in Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. [彭守璋.祁连山区青海云杉林生长过程及其固碳能力研究[D].兰州:兰州大学,2015.]
- [14] Wang Youkui, Guo Shengxiang. Estimation of forest ecosystem service value in the Qilian Mountains National Nature Reserve in Gansu of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(6): 1905–1911. [汪有奎,郭生祥.甘肃祁连山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估[J].中国沙漠,2013,33(6):1905–1911.]
- [15] Su Yubo, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Estimation of alpine grassland biomass and analysis of its spatial distribution characteristics in typical small watershed of Qilian Mountain[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(2): 79–84. [苏玉波,张福平,冯起,等.祁连山典型小流域高寒草地生物量估算及空间分布特征[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2015,43(2):79–84.]
- [16] Zhang Yushun, Jia Wenxiong. Spatial-temporal variations of net primary productivity of Qilian Mountains vegetation based on CASA Model[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sini*

- ca, 2014, 34(10): 2085–2091. [张禹舜, 贾文雄. 基于 CASA 模型研究祁连山地区植被净初级生产力的时空变化[J]. 西北植物学报, 2014, 34(10): 2085–2091.]
- [17] Jiang Ye. Estimating the parameters of forest ecosystem's carbon sequestration in Qilian Mountains based on remote sensing [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013. [姜烨. 祁连山森林生态系统固碳参量的遥感估算[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.]
- [18] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990 – 2000: an analysis based on Landsat TM data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 442–456.
- [19] Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st Century [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64 (12): 1411–1420. [刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1411–1420.]
- [20] Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhuang Dafang. Remote sensing monitoring methods of land use/cover change in national scale [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2012, 40 (4): 2365–2369. [徐新良, 刘纪远, 庄大方. 国家尺度土地利用/覆被变化遥感监测方法[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(4): 2365–2369.]
- [21] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Remote sensing estimation of net primary productivity of terrestrial vegetation in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31 (3): 413–424. [朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (3): 413–424.]
- [22] Li Xiaojuan. Study on the influence of climate change and human activities on grassland evolution in Qilian Mountains [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018. [李肖娟. 气候变化和人类活动对祁连山草地演变影响程度的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.]
- [23] Feng Yiming, Yao Aidong, Jiang Lina. Improving the CASA model and applying it to estimate the net primary productivity of arid region ecology system [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 28(8): 39–43. [冯益明, 姚爱冬, 姜丽娜. 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, 2018, 28(8): 39–43.]
- [24] Wang Yan. Estimation of soil organic carbon in semi-arid area by remote sensing [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018. [王燕. 半干旱地区土壤有机碳遥感估算研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.]
- [25] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9 (1): 23–36.
- [26] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (5): 533–544. [王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55 (5): 533–544.]
- [27] Meng Xiangjiang, Hou Yuanzhao. Research advance in valuation theory and assessment method of forest ecosystem services [J]. World Forestry Research, 2010, 23(6): 8–12. [孟祥江, 候元兆. 森林生态系统服务价值核算理论与评估方法研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(6): 8–12.]
- [28] Liu Kaixuan, Jin Sheng. The study on comparisons of forest carbon sinks pricing methods in national trading market [J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(2): 96–100. [刘凯旋, 金笙. 国内森林碳汇市场交易定价方法比较研究[J]. 农业工程, 2011, 1(2): 96–100.]
- [29] Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Lin Zhihui. Dynamic assessment of the values of CO₂ fixation and O₂ release in Qinghai-Tibet Plateau ecosystem [J]. Geographical Research, 2013, 32 (4): 663–670. [刘宪锋, 任志远, 林志慧. 青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评[J]. 地理研究, 2013, 32 (4): 663–670.]
- [30] Yan Kui. Carbon storage and evaluation of mangrove wetlands in Dongzhaigang, Hainan [D]. Haikou: Hainan Normal University, 2015. [颜葵. 海南东寨港红树林湿地碳储量及固碳价值评估[D]. 海口: 海南师范大学, 2015.]
- [31] Liu Yarong. Temporal and spatial variation characteristics and future trends of vegetation net primary productivity based on AVIM2 Model in Qilian Mountains [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015. [刘亚荣. 基于 AVIM2 模型的祁连山植被净初级生产力的时空变化特征及未来变化趋势预测[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.]
- [32] Zhao Guoshuai. Estimation of net primary productivity in Qinghai Province with LUE Model [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011. [赵国帅. 基于光能利用率模型的青海植被净初级生产力模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.]
- [33] Jiao Wei, Chen Yaning, Li Zhi. Remote sensing estimation and the reasons for temporal-spatial differences of vegetation net primary productivity in arid region of Northwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 181–189. [焦伟, 陈亚宁, 李稚. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 181–189.]
- [34] Pan S F, Tian H Q, Lu C Q, et al. Net primary production of major plant functional types in China: vegetation classification and ecosystem simulation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (2): 28–36.
- [35] Liu Zhihong, McVicar T R, Li LingTao, et al. Interpolation for time series of meteorological variable s using ANUSPLIN [J]. Journal of Northwest A & F University, 2008, 36(10): 227–234. [刘志红, Tim R. McVicar, Li LingTao, 等. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 227–234.]
- [36] Ren Zhiyuan, Liu Yanxu. Contrast in vegetation net primary productivity estimation models and ecological effect value evaluation in Northwest China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(4): 494–502. [任志远, 刘焱序. 西北地区植被净初级生产力估算模型对比与其生态价值评价[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(4): 494–502.]
- [37] Fan Jianzhong, Li Dengke, Zhou Hui. Comparison of GLOPEM and MOD17A3 NPP [J]. Shaanxi Meteorology, 2013, 2013(1): 21–25. [范建忠, 李登科, 周辉. GLOPEM 与 MOD17A3 NPP 的比较[J]. 陕西气象, 2013, 2013(1): 21–25.]
- [38] Chang Zongqiang, Feng Qi, Si Jianhua, et al. Soil carbon storage and CO₂ flux under different vegetation types in Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27 (5): 681–688. [常宗强, 冯起, 司建华, 等. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学杂志, 2008, 27 (5): 681–688.]
- [39] Wang Heling. Effects of landuses on soil organic carbon stock in alpine meadow in the Eastern Qilian Mountains Area: a case study of Liancheng National Nature Reserve, Gansu [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. [王合领. 祁连山东缘高寒

- 草甸区土地利用对土壤有机碳的影响研究——以甘肃连城国家级保护区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.]
- [40] Hu Qiwei, Ouyang Hua, Liu Xiande, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen along the altitudinal belt in the northern slope of Qilian Mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(6): 654–661. [胡启威, 欧阳华, 刘贤德, 等. 祁连山北坡垂直带土壤碳氮分布特征[J]. *山地学报*, 2006, 24(6): 654–661.]
- [41] Li Shuo, Jiang Zhehao, Zhang Degang, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon in northern slope of alpine meadow steppe in Qilian Mountains in Qilian County[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(8): 1469–1475. [李硕, 姜哲浩, 张德罡, 等. 青海省祁连县高寒草甸草原土壤有机碳分布特征[J]. *草业科学*, 2016, 33(8): 1469–1475.]
- [42] Zhu Meng, Liu Wei, Qin Yanyan, et al. Distribution of soil carbon at hillslope scale in forest-steppe zone of Qilian Mountains[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(3): 741–748. [朱猛, 刘蔚, 秦燕燕, 等. 祁连山森林草原带坡面尺度土壤有机碳分布[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 741–748.]
- [43] Zhang Chong, Ren Zhiyuan. Dynamic evaluation of the value of carbon fixation and oxygen release based on land ecosystem in Northern Shaanxi [J]. *Geographical Research*, 2015, 34(8): 1522–1534. [张翀, 任志远. 陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评[J]. *地理研究*, 2015, 34(8): 1522–1534.]
- [44] Sun Liwei. Temporal and spatial distribution characteristics of vegetation net primary productivity and impacts of climate change and human activities in the Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013. [孙力炜. 祁连山区植被净第一性生产力的时空分布特征及气候变化和人类活动的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.]
- [45] Cao Jingjuan. Effects of grassland management changes on soil organic carbon and nitrogen pools in the Qilian Mountains, China[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010. [曹静娟. 祁连山草地管理方式变化对土壤有机碳、氮库的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.]
- [46] Peng Min. Gansu ecological environment of Qilian Mountain area in Qinghai and integrated ecological management of small watershed[M]. Beijing: China Forestry Press, 2017. [彭敏. 青海祁连山地区生态环境与小流域综合生态治理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.]
- [47] Chang Zongqiang, Feng Qi, Si Jianhua, et al. Carbon storage of plant debris under different types of vegetation in Qilian Mountains [J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(6): 714–720. [常宗强, 冯起, 司建华, 等. 祁连山不同植被类型残体碳库贮量研究[J]. *山地学报*, 2007, 25(6): 714–720.]

Estimation of the carbon sequestration value and spatial and temporal evolution of different vegetation ecosystems in Qilian Mountains

ZENG Panru^{1,2}, ZHANG Fuping^{1,2}, FENG Qi³, WEI Yongfen⁴, HUANG Lianghong⁵, LI Ling^{1,2}

(1. College of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Shaanxi key Laboratory of Tourism Informaticsm, Xi'an 710119, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. River Basin Research Center, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan; 5. Civil Aviation Shanxi Air Traffic Control Branch, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Based on the improved CASA model, in this paper, the net primary productivity (NPP) quality of vegetation in the Qilian Mountains is estimated, and the vegetation and soil carbon sequestration and value are further estimated in the study area in 2005, 2010 and 2015 based on photosynthesis equation and carbon cycle process model. The quantitative analysis of the spatial and temporal evolution of vegetation and soil carbon sequestration values of various vegetation ecosystems in this region provide a scientific basis for the development of more scientific and rational carbon management measures. The research shows that the value of vegetation and soil carbon sequestration in the Qilian Mountains had increased from 2005 to 2015. The value of vegetation was 515.95×10^8 yuan, 491.05×10^8 yuan and 581.55×10^8 yuan in 2005, 2010 and 2015; the value of soil carbon sequestration was 356.56×10^8 yuan, 404.36×10^8 yuan and 465.65×10^8 yuan in 2005, 2010 and 2015. The change of land type has increased the soil and soil carbon sequestration by 12.72% and 30.39%, respectively. From the perspective of spatial distribution, the carbon sequestration in the eastern vegetation and soil is significantly higher than that in the west. The carbon sequestration capacity of the forest is the highest, and the carbon sequestration per unit area is $10.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. Grassland is the most widely distributed vegetation in the study area, of which the contribution ratio to vegetation and soil carbon sequestration in this area is 51.13% and 49.34% respectively.

Key words: net primary productivity (NPP) estimation; Qilian Mountains; carbon sequestration value; photosynthesis; soil basal respiration

(本文编辑: 周成林)