

DOI: 10.5846/stxb201805251151

张萌萌, 刘梦云, 常庆瑞, 刘京, 刘欢, 张杰, 杨静涵, 曹润珊. 陕西黄土台塬近三十年耕地动态变化的表层土壤有机碳效应研究. 生态学报, 2019, 39(18): - .

Zhang M M, Liu M Y, Chang Q R, Liu J, Liu H, Zhang J, Yang J H, Cao R S. Effects of topsoil organic carbon on the dynamic change in cultivated land in the Tableland of the Loess Plateau in Shaanxi over the last thirty years. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

陕西黄土台塬近三十年耕地动态变化的表层土壤有机碳效应研究

张萌萌^{1,2}, 刘梦云^{1,2,*}, 常庆瑞^{1,2}, 刘京^{1,2}, 刘欢^{1,2}, 张杰^{1,2}, 杨静涵^{1,2}, 曹润珊^{1,2}

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100

摘要:区域土地利用类型转变对土壤有机碳储量的影响,是生态环境效应评价的核心问题。根据土壤样点和土地利用数据,研究了陕西黄土台塬近三十年耕地转变对表层(0—20 cm)土壤有机碳密度和储量的影响。结果表明:(1)1985—2006、2006—2015年耕地的土地利用转化率分别为2.81%和17.89%,说明退耕还林政策加快了研究区土地利用类型转换速度。(2)研究区近三十年不同年份耕地表层土壤有机碳密度变化差异较大,1985年为1.73 kg/m²,2006年较之增加8.09%,2015年较2006年增加36.36%。(3)1985—2006年,耕地不变和发生转变的面积分别为9429.87 km²和272.41 km²,表层土壤增加的碳储量分别为927.93×10⁶ kg和33.8×10⁶ kg。2006—2015年,耕地不变和发生转变的面积分别为8119.04 km²和1768.47 km²,表层土壤碳储量增加值分别为3132.79×10⁶ kg和1198.99×10⁶ kg。(4)耕地转变为林草地等类型,有利于表层土壤有机碳储量的增加,是朝着碳汇方向进行。因此,陕西黄土台塬退耕还林可以增加生态系统碳固定。

关键词:土壤有机碳储量;耕地;动态变化;黄土台塬

Effects of topsoil organic carbon on the dynamic change in cultivated land in the Tableland of the Loess Plateau in Shaanxi over the last thirty years

ZHANG Mengmeng^{1,2}, LIU Mengyun^{1,2,*}, CHANG Qingrui^{1,2}, LIU Jing^{1,2}, LIU Huan^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, YANG Jinghan^{1,2}, CAO Runshan^{1,2}

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Ministry of Agriculture, Northwest Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment, Yangling 712100, China

Abstract: The impact of regional land use type change on soil organic carbon storage is the core issue affecting the evaluation of ecological environmental effects. According to soil samples and land use data, the effects of land use change of cultivated land on soil organic carbon density (SOCD) and carbon storage (SOCS) in the surface layer (0—20 cm) of the Loess Plateau, Shaanxi, over the past 30 years was studied. The results showed that: (1) The land use conversion rates of cultivated land from 1985 to 2006 and 2006 to 2015 were 2.81% and 17.89%, respectively, indicating that the policy on converting farmlands to forests accelerated the speed of land conversion of land use types in the study area. (2) The changes in surface SOCD of cultivated land over the past three decades in the study area were quite different. The SOCD was 1.73

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JZ008);国家重点研发计划项目(2016YFC0501703);陕西省重点研发计划(2017NY-063)

收稿日期:2018-05-25; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmy471993@163.com

kg/m² in 1985, and this increased by 8.09% in 2006 and 36.36% in 2015. (3) From 1985 to 2006, the areas of cultivated land remained unchanged and changed were respectively 9429.87 km² and 272.41 km²; the increased SOCS were 927.93×10⁶ kg and 33.8×10⁶ kg, respectively. From 2006 to 2015, the areas of cultivated land remained unchanged and changed were respectively 8119.04 km² and 1768.47 km²; the increased SOCS were 3132.79×10⁶ and 1198.99×10⁶ kg, respectively. (4) The conversion of cultivated land to forest and other land types supports the increase of top SOCS, and creation of carbon sinks. Therefore, returning farmlands to forests by the tableland of the Loess Plateau in the Shaanxi Province may increase carbon fixation in ecosystems.

Key Words: soil organic carbon storage; cultivated land; dynamic change; the tableland of the Loess Plateau

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,土壤有机碳库是陆地碳库的主要组成部分,全球土壤碳储量约为 2500 Pg (1 Pg = 10¹² kg) C,其中以有机态储存在土壤中的碳约为 1550 Pg^[1],土壤碳库的微小变化将导致碳汇或碳源的大小和分布发生极大变化^[2]。土地利用是碳固定和排放的重要影响因素^[3-4],通过土地利用/土地覆盖变化(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)影响土壤有机碳储量及分布,来进一步影响全球碳循环,已成为当前研究热点^[5]。耕地有机碳是农田土壤碳库的重要组成部分,研究耕地有机碳及储量的变化规律对了解耕地固碳潜力、提高耕地管理质量有重要意义^[6]。

国内外学者对耕地有机碳变化做了大量研究,张春华等^[7]、任春颖等^[8]研究了松嫩平原玉米带农田土壤有机碳时空分布、碳储量及固碳潜力。Maia 等^[9]研究了巴西塞拉多和亚马逊地区不同农耕措施对有机碳的影响。目前,许多学者基于某地区某一时刻土地利用类型变化的土壤碳效应展开研究,集中在国家尺度^[10]、省域尺度^[11]或小区域尺度^[12-13]。而关于黄土高原地区不同植被恢复阶段的土地利用类型转变后的土壤碳效应研究相对较少。因此,本文以全国第二次土壤普查数据、野外采样数据和土地利用数据为基础,从区域尺度上对陕西黄土台塬 1985—2015 年表层土壤有机碳密度和土地利用转变进行研究,探讨近三十年研究区耕地动态变化对土壤有机碳储量的影响,对研究半干旱半湿润地区不同植被恢复阶段的土壤碳储量变化驱动因子具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西黄土台塬位于 34°08′—35°52′N, 106°20′—110°36′E 之间,总面积约 12887.11 km²,是中国黄土台塬的主体,面积约占中国黄土台塬的 2/3^[14],塬面比较完整平坦,多呈阶梯状地。黄土台塬是黄土高原一个特殊的地貌单元^[15]。按照市级行政区划,可将陕西黄土台塬划分为渭南台塬、铜川台塬、西安台塬、咸阳台塬和宝鸡台塬(图 1)。著名的台塬有孟塬、白鹿塬和神禾塬等。该区沿渭河南北两侧呈条带状东西走向分布,属于东北季风区向西北干旱与半干旱的内陆地区过渡地带。多年平均气温介于 6.52—15.59 °C,地域分异明显,温暖湿润,四季分明。多年平均年降水量介于 408.45—786.04 mm,季节性明显,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。境内自然条件与土壤类型复杂多样,主要土壤类型为黄绵土、壤土、新积土等。研究区成土母质多样,生物资源丰富,主要植被类型有阔叶林、针叶林、灌丛、草原等。森林以乔木和灌木为主,主要分布在渭北和秦岭北部地区,渭北地区是山地向台塬的过渡区,地面侵蚀强烈,地形破碎。黄土台塬区农业历史悠久,是陕西省重要的粮食生产基地。研究区属于黄河流域,该区水资源比较贫乏,地表水和地下水主要依靠降水补给。

1.2 数据来源

本文采用的数据包括土地利用数据、有机碳数据、气候数据和地形数据。其中,土地利用数据来自于 1:10 万比例尺土地利用现状遥感监测数据库,基于 landsat 8 遥感影像,通过人工目视解译得到土地利用/土地覆被数据。参照第二次全国土地调查土地分类系统,将研究区土地利用类型分为草地、居民工矿用地、耕

地、林地、水域、未利用土地和园地。本文选取 1980、2005、2015 年三期土地利用数据进行研究,1985 年和 2006 年土地利用是在 1980 和 2005 年基础上更新所得;土壤有机碳数据分别来自于全国第二次土壤普查《陕西土种志》^[16],2006 年前后陕西省耕地地力调查与质量评价数据,及 2015 年国家科技基础性工作专项项目“陕西省土系调查与土系志编制”野外采样实验数据。其中,陕西省第二次土壤普查为 1979—1990 年,本文选取中间节点 1985 年进行研究;2015 年野外采样布设了 175 个采样点,野外采集土壤样品,采样深度为 0—20 cm。土壤容重、有机碳和机械组成分别采用环刀法、容量分析法和吸管法测定,结合有机碳估算模型,计算出土壤有机碳密度和储量;气候数据来源于国家气象科学数据共享服务平台,1985—2015 年陕西省 35 个气象站点的平均气温和降水量数据;地形数据来自于地理空间数据云,30 m 分辨率数字高程数据。

1.3 计算方法

土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)是指单位面积一定深度的土层土壤有机碳的储量,是评价和衡量土壤有机碳储量的一个重要指标^[17]。土壤有机碳储量(soil organic carbon storage, SOCS)是指区域范围内土层包含土壤有机碳的总量,是表征土壤固碳潜力的指标。目前土壤碳储量估计的方法有:生命带法(模型法)、植被类型法和土壤类型法,其中土壤类型法应用最为广泛^[18]。

土壤有机碳密度(SOCD)计算公式:

$$SOCD = (1 - \theta\%) \rho \times 0.58 \times C \times D / 100 \quad (1)$$

式中,SOCD 为土壤剖面有机碳密度(kg/m^2); θ 为表层>2mm 砾石含量(%); ρ 为土壤容重(g/cm^3);0.58 为 Bemmelen 换算系数; C 为土壤有机质含量(g/kg); D 为土层厚度(cm)。

土壤有机碳储量(SOCS)计算公式:

$$SOCS = SOCD \times A \quad (2)$$

式中,SOCS 为土壤有机碳储量(kg); A 为土壤的面积(km^2)。

1.4 数据处理与分析

依据采样点的经纬度坐标与研究区的空间分布坐标数据,利用 ArcGIS 10.2 空间分析工具进行插值运算,分别得到 1985、2006、2015 年研究区表层土壤耕地有机碳密度图。此外,利用土地利用图分别获得 1985、2006、2015 年各土地利用类型的矢量图层和面积。通过数据融合和叠置分析,做出土地利用转移矩阵(1985—2006 年、2006—2015 年)。对不同年份耕地的矢量图进行相交处理,可以得到保持不变的耕地面积;对不同年份不同土地利用类型的矢量图进行相交处理(耕地-草地、耕地-居民工矿用地、耕地-林地、耕地-园地),可以得到耕地发生转变的面积。将土地利用变化图和有机碳密度变化图进行区域统计分析,得出土地利用类型变化与表层 SOCD 的对应关系,继而得到土地利用变化与表层 SOCS 的关系。

2 结果与分析

2.1 土地利用

近三十年陕西黄土台塬土地利用类型发生明显改变,尤其是在 21 世纪初,由于国家退耕还林政策的提出,对土地利用类型的转变产生很大影响。通过对各种类型的面积进行统计分析(图 2)得出:陕西黄土台塬

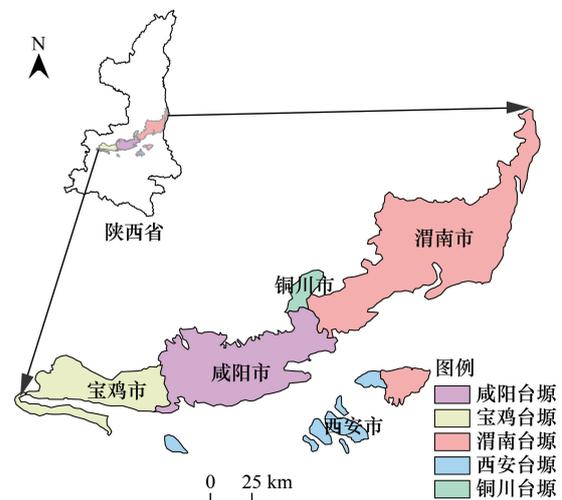


图 1 陕西黄土台塬区范围图

Fig.1 The diagram of the tableland of the Loess Plateau region in Shaanxi province

近三十年土地利用类型的转变主要集中在耕地、草地、水域和园地面积的相继减少,居民工矿用地和林地面积的逐渐增多,未利用土地面积变化不大。其中,耕地面积在 1985—2006 年期间呈现增加趋势,增加值为 199.45 km²,增幅为 2.06%;后因国家退耕还林政策的开展实施,耕地面积明显减少,减少 596.49 km²,减幅为 6.41%。近三十年,草地、水域和园地面积分别减少 486.58 km²、30.8 km²和 21.69 km²,减幅分别为 26%、38%、21%;居民工矿用地和林地面积分别增加 266.67 km²和 659.34 km²,增幅分别为 29%和 273%。这是因为 2006 年前,由于人口不断增加,对粮食等作物的需求不断加大,导致耕地快速扩张,不少草地被开垦为耕地,用以满足人民日益增长的农产品需求;2006 年后,由于国家退耕还林工程的实施,导致研究区土地利用类型发生很大变化。

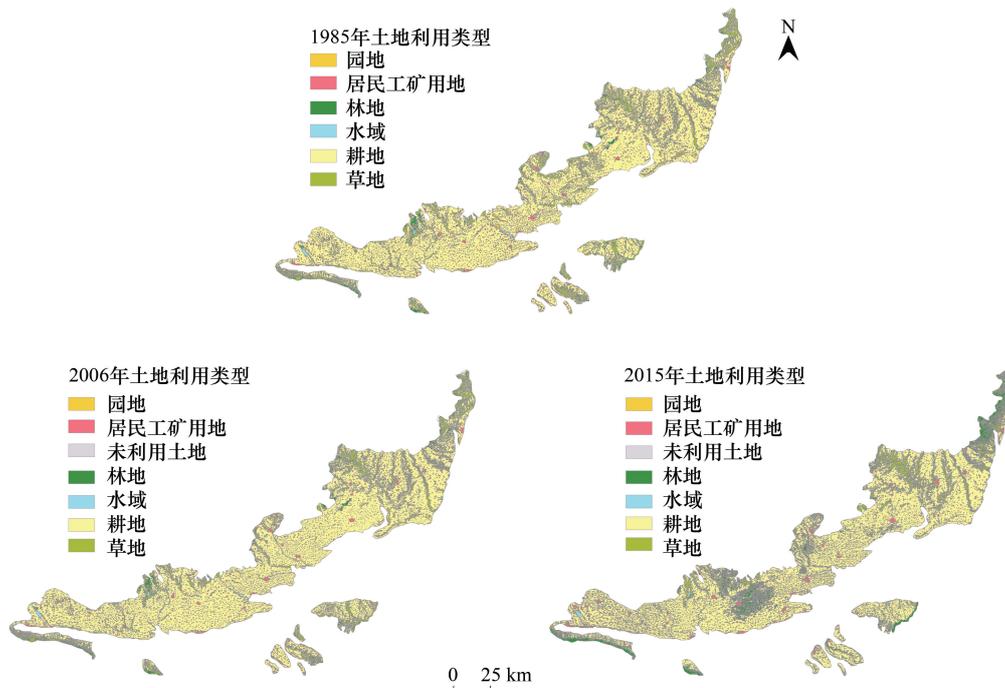


图 2 1985、2006、2015 年陕西黄土台塬土地利用类型变化

Fig.2 The varieties of land use types on the tableland of the Loess Plateau in Shaanxi in 1985, 2006 and 2015

2.2 土壤有机碳

近三十年,陕西黄土台塬耕地表层 SOCD 空间分布变化差异较大(图 3)。研究区耕地表层土壤平均 SOCD 在 1985、2006 和 2015 年分别为 1.73 kg/m²、1.87 kg/m²和 2.55 kg/m²;与前一时期相比,增加值分别为 0.14 kg/m²和 0.68 kg/m²,增幅分别为 8.09%和 36.36%。研究区有机碳水平较低,这是因为研究区处于半干旱半湿润地区,蒸发强度大,有机碳矿化剧烈,损失严重。作为陕西省主要粮食生产基地,为保持土壤肥力,常采用施肥等措施促进作物生长、提高作物产量,从而提高土壤有机碳。由(a)可知,1985 年耕地表层 SOCD 主要集中在少于 2.18 kg/m²范围,占比达 98%以上,其中西南地区略高于东北地区,即宝鸡台塬和咸阳台塬 SOCD 相对较高;由(b)可知,2006 年 SOCD 集中在 <2.18 kg/m²和 2.18—3.02 kg/m²,占比分别为 79.63%和 19.02%,较 1985 年有所提高,但各地区变化情况有差异,其中宝鸡台塬、西安台塬和铜川台塬增长较多,咸阳台塬部分地区略有减少;由(c)可知,2015 年表层 SOCD 主要集中在 2.18—3.02 kg/m²和 3.02—3.78 kg/m²,占比分别为 77.51%和 14.42%,和前期相比整个研究区域都有明显增加,部分地区增加显著,其中咸阳台塬和渭南台塬 SOCD 整体大幅度增加,宝鸡台塬东北部增加明显。

2.3 耕地动态变化的表层土壤有机碳效应

由表 1 可知,1985—2006 年,耕地保持不变和发生转变的面积分别为 9429.87 km²和 272.41 km²,分别占研究区总面积的 97.19%和 2.81%。从 SOCD 来看,耕地转为林地、草地和园地,有机碳密度多为增加,而转为

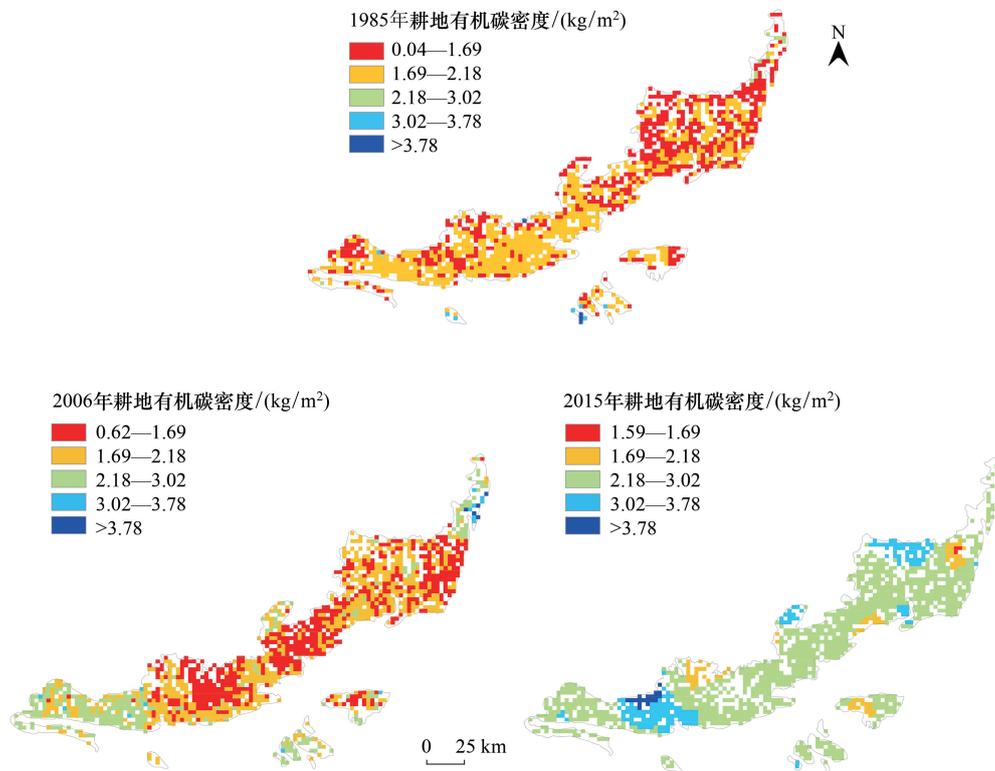


图3 1985、2006、2015年陕西黄土台塬耕地表层土壤有机碳密度图

Fig.3 Surface SOCD of the cultivated land in the tableland of the Loess Plateau in Shaanxi in 1985, 2006 and 2015

耕地和居民工矿用地,有机碳密度多为减少。耕地利用方式保持不变和发生转变的表层 SOCS 变化量分别为 927.93×10^6 kg 和 33.80×10^6 kg,所占比例分别为 96.49% 和 3.51%,年增速分别为 44.19×10^6 kg 和 1.61×10^6 kg。具体来看,耕地转化为居民工矿用地、草地、园地和林地的面积分别为 163.42 km²、 75.38 km²、 26.47 km² 和 7.14 km²,分别占 1985 年耕地总面积的 1.68%、0.78%、0.27% 和 0.07%;表层 SOCS 的增加值分别为 12.71×10^6 kg、 11.97×10^6 kg、 4.07×10^6 kg 和 5.04×10^6 kg,占 SOCS 总增加量的比例分别为 1.32%、1.25%、0.42% 和 0.52%,年增速分别为 0.61×10^6 kg、 0.57×10^6 kg、 0.19×10^6 kg 和 0.24×10^6 kg。1985—2006 年耕地的土地利用转化率为 2.81%,这表明研究区耕地的转化率较低,主要的土地利用类型仍是耕地,发生转变的类型主要是由耕地转变为居民工矿用地。

表1 1985—2006年耕地转变的土壤有机碳密度和储量变化

Table 1 SOCD and SOCS changes of cultivated land conversion from 1985 to 2006

土地利用类型变化 Land use change	面积 Area/km ²	碳密度最小变化值 Minimum change in SOCD/(kg/m ²)	碳密度最大变化值 Maximum change in SOCD/(kg/m ²)	碳密度变化均值 Average change in SOCD/(kg/m ²)	碳储量变化 The change of SOCS/10 ⁶ kg
耕地-耕地 cultivated land- cultivated land	9429.87	-1.57	8.24	0.10	927.93
耕地-草地 cultivated land-grass land	75.38	-0.20	0.36	0.16	11.97
耕地-居民工矿用地 cultivated land-residential land	163.42	-0.31	0.82	0.08	12.71
耕地-林地 cultivated land-forest land	7.14	0.53	0.88	0.71	5.04
耕地-园地 cultivated land-garden land	26.47	-0.15	0.35	0.15	4.07
总计 Total	9702.28	-	-	-	961.73

表2显示,2006—2015年,耕地保持不变和发生转变的面积分别为8119.04 km²和1768.47 km²,占总面积比例分别为82.11%和17.89%。表层SOCS变化量分别为3132.79×10⁶ kg和1198.99×10⁶ kg,占总变化量比例分别为72.32%和27.68%,年增速分别为348.09×10⁶ kg和133.22×10⁶ kg。具体来看,耕地转化为居民工矿用地、草地、林地和园地的面积分别为651.83 km²、531.16 km²、527.84 km²和57.64 km²,占2006年耕地总面积的比例分别为6.59%、5.37%、5.34%和0.58%;表层SOCS增加值分别为402.03×10⁶ kg、368.62×10⁶ kg、391.46×10⁶ kg和36.87×10⁶ kg,占总增加量比例分别为9.28%、8.51%、9.04%和0.85%,年增速分别为44.67×10⁶ kg、40.96×10⁶ kg、43.50×10⁶ kg和4.10×10⁶ kg。2006—2015年研究区耕地转化率为17.89%,和1985—2006年相比,转化率增加,说明耕地保持不变的面积在减少,耕地向其他地类的转化增加明显,尤其是耕地-林地,与1985—2006年相比,发生转变的面积增加520.71 km²,是变化最大的土地利用类型转换。

表2 2006—2015年耕地转变的土壤有机碳密度和储量变化

Table 2 SOCD and SOCS changes of cultivated land conversion from 2006 to 2015

土地利用类型变化 Land use change	面积 Area/km ²	碳密度最小变化值 Minimum change in SOCD/(kg/m ²)	碳密度最大变化值 Maximum change in SOCD/(kg/m ²)	碳密度变化均值 Average change in SOCD/(kg/m ²)	碳储量变化 The change of SOCS/10 ⁶ kg
耕地-耕地 cultivated land- cultivated land	8119.04	-2.37	3.29	0.39	3132.79
耕地-草地 cultivated land-grass land	531.16	-2.37	2.03	0.69	368.62
耕地-居民工矿用地 cultivated land-residential land	651.83	-1.70	3.29	0.62	402.03
耕地-林地 cultivated land-forest land	527.84	-1.02	1.55	0.74	391.46
耕地-园地 cultivated land-garden land	57.64	-0.36	1.07	0.64	36.87
总计 Total	9887.52	-	-	-	4331.78

将陕西黄土台塬1985—2006年和2006—2015年耕地保持不变和发生转变的表层土壤SOCD的变化值进行对比分析,发现大多数土地利用类型发生转变时表层SOCD增加值高于耕地类型保持不变时(图4),说明这些地类的转变有利于表层SOCS的增加,即有利于表层土壤碳汇的形成^[11]。通过对表1、表2和图4的对比分析得出,近三十年耕地保持不变的面积在降低,发生转变的面积在增加。1985—2006年,耕地类型保持不变的面积是发生转变面积的34.62倍,增加的碳储量是其27.46倍;2006—2015年,耕地类型保持不变的面积是发生转变面积的4.59倍,增加的碳储量是其2.61倍。这进一步反映出耕地保持不变的面积比重在降低,发生转变的面积比重在增加,并且土地利用类型发生转变时的碳储量增加值所占比重在不断增大。对保持用地类型而言,后一阶段(2006—2015年)的地类面积是前一阶段(1985—2006年)面积的0.86倍,而后一阶段的碳储量是前一阶段的3.38倍;对转变用地类型而言,后一阶段的面积是前一阶段的6.49倍,而后一阶段的碳储量是前一阶段的35.48倍。这表明研究区土壤质量在不断改善,尤其在退耕还林政策实施后,土地利用类型

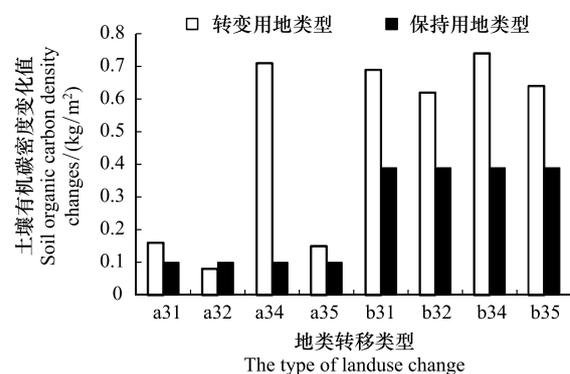


图4 1985—2015年陕西黄土台塬区转变和保持土地利用类型表层土壤有机碳密度变化比较

Fig.4 Comparison of SOCD between changed and maintained land use types from 1985 to 2015

图中字母a代表1985—2006年,b代表2006—2015年。数字编码代表土地利用类型,分别为:1表示草地;2表示居民工矿用地;3表示耕地;4表示林地;5表示园地

的转变更加剧烈,植被明显恢复,并且碳储量极大增加,说明大部分土地利用类型的转变有助于碳储量的增加,是朝着碳汇方向进行。

3 讨论

3.1 土地利用与表层土壤碳密度

研究区陕西黄土台塬近三十年土地利用类型变化明显,这是因为研究区位于关中平原地区,地形平坦,耕地所占面积比例达 70% 以上,是分布最广泛的土地利用类型。国家退耕还林政策实施后,用地类型转换更加剧烈,也更有方向性。耕地面积的减少伴随着林地面积的增加,且耕地和草地造林效果明显,林地覆盖率显著提升,在一定程度上对研究区生态恢复起到积极作用,这与刘纪远等^[19]人在 20 世纪 80 年代关于中国土地利用变化的研究结果相同。类似地,周德成等^[20]、周书贵等^[21]对黄土高原地区 LUCC 的研究,也表明退耕还林可显著改变研究区的 LUCC,耕地大幅减少,林草地增加,这些与本文研究结果一致。此外,刘纪远等^[22]对近年(2010—2015 年)中国土地利用变化的时空格局进行分析时发现,西部黄土高原地区耕地有一定数量的减少,这与本文研究结论相同,但目前已有的研究表明我们面临着对中西部地区相关土地利用类型实现有效保护的严峻挑战,由于国家农产品主产区和重点生态功能区主要分布在中西部地区,如何保护及监管,成为政府部门、专家学者等应重点思考的一个问题。

研究区近三十年耕地表层 SOC_D 逐渐增加,尤其是在后一时期增加明显,这可能是由于研究区主要土地利用类型为耕地,由于耕地土壤中自然植被已不存在,有机质主要来自作物根的分泌物、根茬及枯枝落叶等,所以 SOC 较少。退耕还林政策实施后,耕地转变为林地,植被覆盖率变高,林下调落物变多,增大了根系分泌物和凋落物输入,因而 SOC_D 增大。刘宪锋等^[23]研究表明陕西表层 SOC_D 平均值为 3.886 kg/m²。本文研究结果与之相比偏小,这可能是由于土壤有机碳主要来源于动植物和微生物残体及土壤腐殖质,秦巴山区等地植被覆盖度高,因而有利于有机碳的积累,而关中地区多为耕地,因而有机碳密度较低。此外,王绍强等^[18]研究发现中国土壤平均碳密度为 10.53 kg/m²,本文研究结果为中国 SOC_D 的 16%,两者相差较大,究其原因,中国土壤分布广泛,地域差异性较大,因此用局部小地区和全国大范围相比,不可避免存在一定误差。类似地,解宪雨等^[17]研究发现中国 20 cm 的 SOC_D 在 0.27—53.46 kg/m²,空间分布很不均匀,青藏高原区、云贵高原等地 SOC_D 最高,黄土高原地区碳密度变化幅度较大,这在一定程度上为本文提供了支持和参考。

3.2 耕地动态变化的表层土壤有机碳效应

土地利用是影响土壤有机碳含量变化的重要因素^[24-25],其变化对碳循环的影响是当前研究的一个重点。研究区是陕西省主要粮食产区,是全省耕地质量最高的地区^[26]。本文主要研究耕地保持不变及其转变为林地、草地、园地等土地利用类型时的有机碳密度和储量特征。研究表明,2006—2015 年和 1985—2006 年两个时期,耕地保持不变的面积减少 1310.83 km²,有机碳储量增加 2204.86×10⁶kg,年增速增大 7.88 倍。耕地不变情况下有机碳储量增加是因为在自然状态下,耕地土壤的栽培作物每年残留下来的有机物形成的土壤有机质,不足以偿还因矿化而消耗掉的有机质,导致土壤肥力逐年下降,尤其是近年来随着耕地面积的逐渐减少和人口的不断增加,人地矛盾更加尖锐,为了满足人们日益增长的农产品需求,也为了更好的协调人地关系,人们通过推行秸秆还田等改良土壤结构,促进 SOC 累积,同时也采用施入有机肥料(绿肥、堆肥和沤肥等)等措施来提高土壤肥力,提升土壤固碳潜力。孙文义等^[27]研究表明:耕地处于有机碳含量低值区,林地处于高值区,研究结果与本文相似。此外,揣小伟等^[11]研究发现江苏省 1985 到 2005 年耕地类型保持不变时的表层土壤有机碳密度增加,同时文雯等^[28]对黄土高原羊圈沟流域的研究也得出这一结论,研究还发现耕地是一种易形成碳源的土地利用方式。原因在于耕作会破坏土壤团聚体结构,使土壤透气性、温度、水分条件得到改善,微生物呼吸加强,加速 SOC 分解,导致 SOC 大量释放;同时,收获作物使地上部分被大量移走,减少了植被对土壤碳的归还量。

研究还得出耕地发生转变的面积增加 1496.06 km²,有机碳储量增加 1165.19×10⁶kg,年增速增大 82.75

倍。对比可以看出耕地发生转变的有机碳储量年增速显著快于耕地保持不变时的有机碳储量年增速。同时还发现耕地转变为林草地等,有机碳密度多为增加,并且碳储量增加明显。这是因为退耕还林的实施,增加了植物凋落物以及根系土壤碳归还量,能够起到土壤碳汇作用,利于生态系统碳转化以及碳贮蓄^[13]。同时,退耕还林、退耕还草等生态建设可以增强环境抗干扰能力,有助于增加有机碳储量^[29],有利于生态系统的可持续发展。林地植被覆盖度高,林下的凋落物较厚,拦蓄水土、阻挡表层土壤养分功能较强,且根系分泌物和凋落物输入较大^[30],从而使其表层 SOC 的密度高于其他用地。对于草地而言,植被覆盖相对较高,有效减少了土壤侵蚀和水土流失。揣小伟等^[11]、文雯等^[28]的研究发现转变用地类型碳密度增加值高于保持用地时,有利于碳汇形成,反之则造成了碳排放,这一结论为本文提供了支持。同时,刘宪锋等^[23]对陕西土壤有机碳研究显示,耕地 SOCD 明显低于林地和草地,不同用地类型转换会导致土壤有机碳变化,影响陆地生态系统碳循环。此外,李鉴霖等^[31]对缙云山研究结果表明林地及撂荒地 SOC 及各组分碳含量都显著高于果园和坡耕地,坡耕地撂荒有利于碳恢复和截存,这些与本文研究结果相一致。

本文研究了在植被恢复前、恢复初期以及恢复 15 年后三个不同阶段表层有机碳的变化。韩新辉等^[32]研究表明退耕还林(草)的新建植被 10 年左右能形成较稳定的群落,环境条件得到改善,SOCS 也随之增加。孙彩丽等^[33]研究表明黄土高原地区退耕还林(草)的土壤固碳效应在短期内不显著,但长期固碳效应(>35 年)相当可观。这两个结论在一定程度上为本文研究提供了依据。退耕还林(草)的早期新建植被不能产生大量枯落物进入土壤形成有机质,植物根系又必须从土壤中吸入大量营养物质维持自身的新陈代谢,土壤有机质在较强的同化作用下大量消耗,这很好解释了退耕还林在短期内固碳效应不显著的原因, Groenendijk^[34]、Rumpel 等^[35]的研究证明了这一说法。因此土壤的固碳效应是一个长期过程。

本文中由于存在采样过程中不可避免的误差、环境影响、实验结果不够精确、以及人为干扰等不确定性因素的影响,因此结果难免存在差异。文章仅对研究区近三十年耕地转变的碳效应进行了研究,尚未对不同用地类型转变对碳储量的影响进行研究,也缺少对固碳潜力方面的研究,这将是今后主要的研究方向。

4 结论

(1)退耕还林政策对陕西黄土台原用地类型转变产生很大影响。1985—2006 年耕地的土地利用转化率为 2.81%,2006—2015 年为 17.89%,说明退耕还林政策明显加快了用地类型转变速度。耕地转变为林草地,有利于表层土壤有机碳储量的增加。

(2)研究区近 30a 不同年份耕地表层 SOCD 变化差异较大,1985 年耕地表层平均 SOCD 为 1.73 kg/m²,2006 年为 1.87 kg/m²,2015 年为 2.50 kg/m²,增幅分别为 8.09%和 36.36%。1985—2006 年,研究区东北和西南地区以增加为主,而中部地区以减少为主;2006—2015 年,研究区中部、南部和西南地区以增加为主,而东北地区以减少为主。

(3)近 30a 耕地保持不变的面积减少,发生转变的面积增加。1985—2006 年植被恢复前至恢复初期,耕地保持不变和发生改变的面积分别为 9429.87 km²和 272.41 km²,碳储量分别增加 927.93×10⁶kg 和 33.80×10⁶kg。2006—2015 年植被恢复十多年,耕地保持不变和发生改变的面积分别为 8119.04 km²和 1768.47 km²,碳储量分别增加 3132.79×10⁶kg 和 1198.99×10⁶kg。这表明退耕还林有利于生态系统碳固定,植被恢复越久 SOCS 增加越明显。

参考文献 (References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 方精云, 郭兆迪. 寻找失去的陆地碳汇. *自然杂志*, 2007, 29(1): 1-6.
- [3] Deng L, Zhu G Y, Tang Z S, Shangguan Z P. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecology and Conservation*, 2016, 5: 127-138.
- [4] Conant R T, Cerri C E P, Osborne B B, Paustian K. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological*

- Applications, 2017, 27(2): 662-668.
- [5] 张影, 巩杰, 马学成, 张玲玲. 基于文献计量的近 20 多年来土地利用对土壤有机碳影响研究进展与热点. 土壤通报, 2016, 47(2): 480-488.
- [6] 赵明松, 李德成, 王世航. 近 30 年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素. 土壤学报, 2018, 55(3): 595-605.
- [7] 张春华, 王宗明, 任春颖, 宋开山, 张柏, 刘殿伟. 松嫩平原玉米带农田土壤有机碳时空格局. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 300-307.
- [8] 任春颖, 张春华, 王宗明, 张柏. 松嫩平原玉米带农田表层土壤有机碳储量和固碳潜力研究. 自然资源学报, 2013, 28(4): 596-607.
- [9] Maia S M F, Ogle S M, Cerri C C, Cerri C E P. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 177-184.
- [10] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 刘明亮, 庄大方. 1990—2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. 地理学报, 2004, 59(4): 483-496.
- [11] 揣小伟, 黄贤金, 赖力, 张梅. 基于 GIS 的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应. 农业工程学报, 2011, 27(9): 1-6.
- [12] 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Khan M N, Sial T A. 陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征. 环境科学, 2018, 39(1): 339-347.
- [13] 程淑兰, 欧阳华, 牛海山, 王琳, 田玉强, 张锋, 高俊琴. 荒漠化重建地区土壤有机碳时空动态特征——以陕西省榆林市为例. 地理学报, 2004, 59(4): 505-513.
- [14] 齐矗华. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究. 西安: 陕西人民教育出版社, 1991: 1-83.
- [15] 马彩虹, 任志远, 李小燕. 黄土台塬区土地利用转移流及空间集聚特征分析. 地理学报, 2013, 68(2): 257-267.
- [16] 张相麟, 喻建波. 陕西省土壤普查办公室. 陕西土种志. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993: 1-711.
- [17] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- [18] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松雨, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [19] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [20] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响——以陕西省安塞县为例. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1866-1878.
- [21] 周书贵, 邵全琴, 曹巍. 近 20 年黄土高原土地利用/覆被变化特征分析. 地球信息科学学报, 2016, 18(2): 190-199.
- [22] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [23] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 基于 GIS 的陕西省土壤有机碳估算及其空间差异分析. 资源科学, 2012, 34(5): 911-918.
- [24] Grandy A S, Robertson G P. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. Ecosystems, 2007, 10(1): 59-74.
- [25] Martens D A, Reedy T E, Lewis D T. Soil organic carbon content and composition of 130 - year crop, pasture and forest land - use managements. Global Change Biology, 2004, 10(1): 65-78.
- [26] 卫新东, 王箴妮, 员学锋, 王晓峰, 张蚌蚌. 陕西省耕地质量时空变化特征及其分异规律. 农业工程学报, 2018, 34(3): 240-248.
- [27] 孙文义, 郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素. 生态学报, 2011, 31(6): 1604-1616.
- [28] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 梁地. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应. 生态学报, 2015, 35(18): 6060-6069.
- [29] 汤洁, 毛子龙, 王晨野, 徐小明, 韩维崢. 基于碳平衡的区域土地利用结构优化——以吉林省通榆县为例. 资源科学, 2009, 31(1): 130-135.
- [30] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [31] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征. 生态学报, 2015, 35(11): 3733-3742.
- [32] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 薛亚龙, 赵发珠. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223-229.
- [33] 孙彩丽. 陕北退耕还林(草)的土壤固碳效应及对碳组分的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014: 1-96.
- [34] Groenendijk F M, Condon L M, Rijkse W C. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils. Geoderma, 2002, 108(1/2): 91-100.
- [35] Rumpel C, Kögel-Knabner I, Bruhn F. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis. Organic Geochemistry, 2002, 33(10): 1131-1142.