

DOI: 10.5846/stxb201401250188

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研究.生态学报,2015,35(18): - .  
Wen W, Zhou B T, Wang Y F, Liang D. Effects of spatio-temporal changes of land-use on soil organic carbon in Yangjuangou watershed in Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): - .

# 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研究

文 雯<sup>1,2</sup>, 周宝同<sup>3</sup>, 汪亚峰<sup>1,\*</sup>, 梁地<sup>1</sup>

1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 1008713. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

**摘要:** 土地利用变化是影响土壤有机碳储量和分布变化的重要驱动因素, 为进一步探讨土地利用变化对土壤有机碳的影响, 根据土壤样点数据、土地利用类型图, 分析了黄土丘陵沟壑区羊圈沟小流域 2006—2011 年土地利用变化及其对表层土壤有机碳密度和储量的影响, 主要结论如下: (1) 小流域土地利用发生较大变化, 主要集中在乔木林地和灌木林地面积的增加, 分别为 39.697 hm<sup>2</sup>、46.404 hm<sup>2</sup>; 以及草地面积的减少, 为 64.030 hm<sup>2</sup>; (2) 土地利用方式的变化会导致土壤有机碳密度及储量的变化, 其中转变用地类型的土壤有机碳储量增加 587.25 kg, 以荒草地转出类型增加的土壤表层有机碳储量最多, 为 441.64 kg; 灌木林地转出类型减少的土壤表层有机碳储量最多, 为 -21.01 kg。草地-灌木林地、草地-乔木林地、坡耕地-草地、坡耕地-灌木林地、坡耕地-乔木林地、坡耕地-坝地、梯田-草地、梯田-灌木林地、梯田-乔木林地、梯田-坝地、坝地-草地、坝地-灌木林地、坝地-乔木林地等转换用地类型的表层土壤碳密度增加值高于保持用地类型碳密度的增加值, 说明这些地类的转换有利于表层土壤有机碳储量的增加, 即有利于表层土壤碳汇的形成; 而其他地类转换造成了表层土壤的碳排放, 应该引起足够的重视; (3) 土壤固碳应着眼于长期效应, 频繁的土地利用类型转化可能会降低土壤碳截流效果, 黄土丘陵区植被重建的长期利用和保持更有利于土壤有机碳的积累。

**关键词:** 土地利用变化; 土壤有机碳; 羊圈沟小流域; 黄土丘陵地区

## Effects of spatio-temporal changes of land-use on soil organic carbon in Yangjuangou watershed in Loess Plateau, China

WEN Wen<sup>1,2</sup>, ZHOU Baotong<sup>3</sup>, WANG Yafeng<sup>1,\*</sup>, LIANG Di<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China

2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing, 100871, China

3. College of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing, 400715, China

**Abstract:** Land use change is an important driving factor for changes of storage and spatial distribution of soil organic carbon (SOC). In order to study effects of land use change on SOC, we analyzed the spatio-temporal changes of land use and their effects on SOC content, density and storage of topsoil based on soil sampling data and land-use map from 2006 to 2011 in Yangjuangou watershed. The main conclusions include that,

(1) Land use types in this watershed changed significantly from 2006 to 2011. The area of grass land, which mainly transformed into shrub land and arboreal land, decreased the most with 64.030 hm<sup>2</sup>, following by sloping farmland mainly

基金项目: 国家自然科学基金(40901098)

收稿日期: 2014-01-25; 网络出版日期: 2014-11-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yfwang@cees.ac.cn

transformed into terrace; the area of shrub land and arboreal land increased rapidly by 39.697 hm<sup>2</sup>, and 46.404 hm<sup>2</sup> respectively, which were converted from the grass land, terrace, sloping farmland, dam land and construction land; the area of terrace was so small that the transformation was not obvious.

(2) Land use change caused change of density and storage of SOC. The increase of carbon storage due to land type changes was 587.25 kg, among which the contribution from changed land types converted from grass land was 441.64 kg. Within all the land use transformations, 'grass land to shrub land', 'grass land to arboreal land', 'sloping farmland to grass land', 'sloping farmland to shrub land', 'sloping farmland to arbor land', 'sloping farmland to terrace', 'sloping farmland to terrace', 'terrace to grass land', 'terrace to shrub land', 'terrace to arboreal land', 'terrace to dam land', 'dam land to grass land', 'dam land to shrub land', and 'dam land to arboreal land' showed higher SOC densities than those of the original land use types. It indicated that these land use transformations were conducive to increase of surface SOC and reduction of carbon emissions, which were beneficial to formation of surface soil carbon sink. However, other land use transformations, which caused increase of surface soil organic carbon emissions, should be paid more attention to.

(3) The content, density and storage of SOC didn't increase so much in Yangjuangou watershed from 2006 to 2011. Nevertheless, soil carbon sequestration should focus on the long-term effects, and frequent transformations of land use types may reduce the intercepting effect of soil carbon. The long-term utilization and maintain of vegetation reconstruction are much more conducive to accumulation of SOC in the Loess hilly-gully regions.

Different transformations of land use types led to different regional changes of SOC storage. Those land use types which converted into shrub land and arboreal land contained the most SOC storage. Therefore, it is of extremely importance to protect forests to mitigate global warming, and the attention should be paid to afforestation and plantation tending management. Only seeking out a suitable mode of land resources management, which is beneficial to increase of sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> through soil and could reverse land degradation process, can it be the best choice for mitigating rising levels of CO<sub>2</sub>.

**Key Words:** Land use change; Soil organic carbon; Yangjuangou watershed; Loess Plateau

土壤碳库是陆地生态系统中最大而又最活跃的有机碳库,也是全球碳循环的重要组成部分,对全球气候变化有着重要的影响<sup>[1]</sup>,其微小变化都将显著地影响着碳汇或碳源的大小和分布<sup>[2]</sup>,增加土壤碳库储量可以减缓由于人类活动导致的大气 CO<sub>2</sub>的增加,相反,土壤中碳的释放将加速大气 CO<sub>2</sub>的升高<sup>[3]</sup>,它是土壤质量评价和土地可持续利用管理中必须考虑的重要指标<sup>[4]</sup>。

土地利用变化是影响陆地生态系统碳循环的主要因素之一,也是仅次于石化燃料燃烧而使大气 CO<sub>2</sub>浓度急剧增加的主要人为活动<sup>[5]</sup>。土地利用变化发生后,由于影响土壤有机碳(SOC)的动态过程和相关性质发生了变化,使 SOC 的储量、分布等也发生了变化,这些变化又将进一步影响土壤向大气释放 CO<sub>2</sub>的强度与过程,因此土地利用变化对 SOC 储量、分布的影响,是对 SOC 影响的本质<sup>[6]</sup>。使土壤碳库贮量积累的过程是碳汇,而使土壤碳贮量减少的过程是碳源。准确认识土地利用变化过程对土壤碳贮量的影响是增加还是减少,是直接还是间接影响,对于准确认识和评价陆地生态系统的碳源/汇功能具有重大意义<sup>[7]</sup>。

SOC 的时空变异性是指在土壤质地相同的区域内,SOC 在同一时刻、各个空间位置上或在不同时刻、同一空间位置上量值的差异性,其变化情况不仅反映 SOC 变化趋势,印证了区域生态演变规律和生态建设的基本成果,也是国际全球气候变化问题研究的核心内容之一<sup>[2]</sup>。目前对于 SOC 变化的研究多集中于同一时刻的不同土地利用类型之间的比较分析<sup>[8]</sup>,而不同时刻同一地区土地利用类型转换后的土壤碳效应差异研究还有待深入。近年来,国内外学者的研究也表明合理的土地利用方式变化可以增加 SOC 含量并影响其时空动态变化<sup>[7-9]</sup>,但在黄土高原小流域尺度上的相关试验研究较少。黄土高原地区地形破碎,土地利用类型复杂多样,也是我国 SOC 储量最低的地区之一<sup>[9, 10]</sup>。20 世纪 90 年代以来,该地区进行了大规模的生态环境修

复工作,尤其是退耕还林工程,通过植被恢复引起了土地利用的变化,并改变了土壤内部及与植物群落的养分循环,必然引起土壤碳库变化<sup>[11]</sup>。由于大量的 SOC 集中于 20 cm 以内的表层中,在不同的土地利用方式作用下,其空间变异较深层(20 cm 以下)的影响更大<sup>[12, 13]</sup>。因此,本文以黄土丘陵沟壑区的羊圈沟小流域为研究对象,结合碳“汇”、“源”的概念,采用野外调查、室内分析并与地统计学相结合的方法,对小流域尺度在 2006—2011 年土地利用变化影响表层土(0—20 cm)有机碳密度、储量及其空间分布格局变化进行综合评价,以为黄土高原植被恢复与生态建设提供参考,也可以为大尺度的研究提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域为位于延安市宝塔区东北方向 14 km 处李渠镇的羊圈沟流域(36°42'N, 109°31'E),总面积为 2.02 km<sup>2</sup>,为延河左岸的二级支沟,碾庄沟流域的一级支流。区域地貌类型为黄土梁和黄土沟,沟谷密度为 2.74 km/km<sup>2</sup>,属典型黄土丘陵沟壑区。区域气候为半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量 535 mm,降水多集中在 7—9 月,年际变率大。流域内土壤以黄绵土为主,抗蚀性差,水土流失严重。近年来流域内实施了退耕还林工程,经过十几年的流域治理,农业景观发生了很大的变化。流域植被在区划上属于森林草原过渡带,流域内由于人为活动的干扰,自然植被破坏殆尽,多为人工种植而形成的次生植被,植物种类主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柳树(*Salix spp.*)和杨树(*Poplar spp.*)等。

### 1.2 采样方法

分别于 2006 年和 2011 年在黄土丘陵区羊圈沟流域选取 6 种具有代表性的土地利用方式进行采样:草地、灌木林地、乔木林地、梯田、坡耕地和坝地(水域和建设用地无采样点)。两次采样方法相同,均按土地利用类型和土壤断面,同时考虑微地貌布设采样点,采用地形剖面线法进行坡面采样,采用 5 点混合的方式采集混合样。采样点为 114 个,按照土地利用类型面积比例分配采样点个数,以保证样本对不同土地利用类型的代表性,面积比例较大的地类如乔木林地和灌木林地样点分布较多,而面积比例较小的地类,如坝地和坡耕地样点分布较少。取样器为荷兰 Eijkekamp 公司生产的直径为 6 cm 的半圆凿型土钻。采样深度为 0—20 cm,土壤样点的具体分配和分布情况如表 1、图 1 所示。野外采样时采用 GPS 定点,确定每个采样点的经纬度坐标,同时详细记录每个采样点的坡度、坡向及其土地利用类型等信息。

表 1 黄土丘陵区羊圈沟流域土地利用面积、采样数及其所占比例

Table 1 Land-use type area, sample size and their proportion in Yangjuangou watershed of hilly region, Loess Plateau

土地利用类型 Land-use type	2006		2011	
	样本数/N Sample number	样本比例/% Sample proportion	样本数/N Sample number	样本比例/% Sample proportion
草地 Grass land	35	30.70	26	22.87
灌木林地 Shrub land	25	21.93	24	21.28
乔木林地 Arboreal land	31	27.19	40	35.11
梯田 Terrace land	6	5.26	7	6.38
坡耕地 Sloping farmland	5	4.39	3	2.13
坝地 Dam land	12	10.53	14	12.23
合计 In total	114	100.00	114	100.00

### 1.3 样品分析方法

粒径测定:取土壤样品过 2 mm 筛后测定土壤粒径,分析采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行,测定前处理主要是去除土壤有机质和碳酸盐,上机前用六偏磷酸钠溶液分散土壤溶液,测量范围为 0.02—2000 μm,重复测量误差小于±3%;

SOC 含量测定:取土壤样品过 0.28 mm 筛后,采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法<sup>[14]</sup>进行测定;

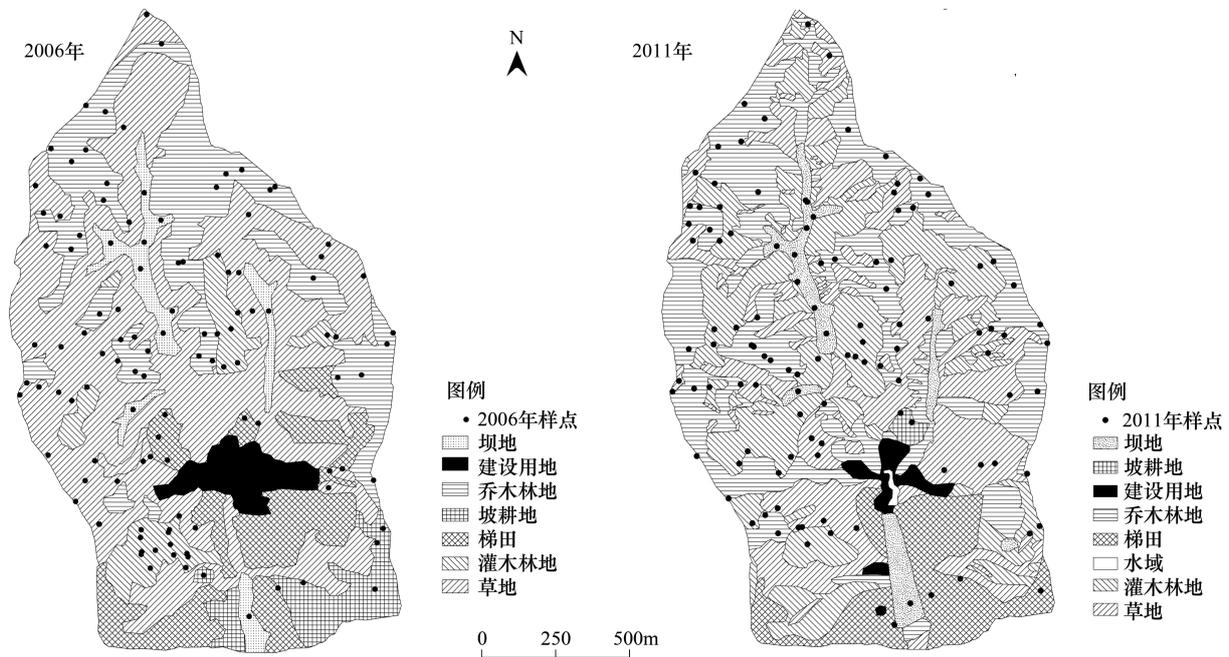


图1 研究区域样点分布图

Fig.1 Distribution map of sample sites in study area

土壤容重( $D_b$ )测定:采用环刀法测定<sup>[15]</sup>。

#### 1.4 计算方法

##### 1.4.1 有机碳密度(Doc)计算方法

$$DOC = SOC \times \gamma \times H \times (1 - \delta_{2mm}/100) \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中, $DOC$ 为SOC密度( $g/m^2$ ); $SOC$ 为SOC重量含量( $g/kg$ ); $\gamma$ 为土壤容重( $g/cm^3$ ); $H$ 为土层厚度( $cm$ ); $\delta_{2mm}$ 为>2 mm土壤粒径百分含量<sup>[16]</sup>。

##### 1.4.2 有机碳储量(Poc)计算方法

$$Poc = \sum_i^n S_i \times \sum_i^n DOC_i \quad (2)$$

式中, $P_{oc}$ 为SOC储量( $g$ ); $S_i$ 为第*i*种土地利用的面积( $m^2$ ), $DOC_i$ 为第*i*种土地利用类型的SOC重量密度( $g/m^2$ )<sup>[5]</sup>。

#### 1.5 统计分析方法

土地利用变化对SOC的影响是一个长期过程,其研究方法包括间接方法和直接方法。间接方法包括相邻样地比较(Paired sites)和空间代替时间方法(Chronosequence)<sup>[17, 18]</sup>,需要的时间较短、易于操作,但是不够客观,是预测的理想结果,忽略了土地利用变化中的实际演变过程;直接测定的方法为不同时间在同一土地利用方式下重复采样分析,这种方法虽然需要较长的时间和严格的控制条件,但是反映的是样地的实际变化特征,真实客观。本研究鉴于对研究地区的土地利用变化的长期观测、准确的时间记载和系统的研究,采用直接测定比较的方法。

首先在Mapgis软件中,将2006年和2011年通过GPS测得的采样点的经纬度坐标与羊圈沟流域的空间分布坐标相连接,将测得的数据导入羊圈沟流域的点位表中,添加到地形图中,得到研究区域采样点的分布图(图1)。然后,根据采样点的数值,采用基于土地利用类型修正的普通克里金空间插值法<sup>[19]</sup>生成2006年和2011年羊圈沟流域表层的SOC密度图,并提取出不同土地利用类型的平均有机碳密度,并据此分析2006—2011年羊圈沟流域表层SOC密度的变化情况。再对羊圈沟流域2006和2011年的土地利用遥感解译图进行

空间叠加生成 2006—2011 年土地利用变化图,将此图与生成的表层 SOC 密度的变化图叠加后进行区域统计,即可得出土地利用变化与表层 SOC 密度的对应关系<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化

以羊圈沟流域 2006 和 2011 年的土地利用类型图(图 1)为底图得到的 2006—2011 年各土地利用转移矩阵如表 2 所示。其中变化最为剧烈的主要有:草地转化为灌木林地,面积为 27.680 hm<sup>2</sup>,占 2006 年草地总量的 30.35%;草地转化为乔木林地的面积为 30.927 hm<sup>2</sup>,占 2006 年草地总量的 33.91%;坡耕地转为梯田,约为 10.999 hm<sup>2</sup>,占 2006 年坡耕地总量的 43.54%。这是由于这期间流域内加大了水土流失治理措施,调整了土地利用结构,使得流域内乔木林地和灌木林地所占比重增加,遍布整个小流域。由于植树造林,梯田转换为乔木林地和灌木林地的趋势较大,尤其是在流域东边和西边较为明显,大部分荒草地也转换为乔木林地、灌木林地和坡耕地,草地是最大的转出者,乔木林地和灌木林地是最大的转入者。

表 2 羊圈沟流域 2006 至 2011 年土地利用转移矩阵(hm<sup>2</sup>)

Table 2 Conversion matrix of land-use changes in Yangjuangou watershed from 2006 to 2011 (hm<sup>2</sup>)

2006—2011	草地 Grassland	灌木林地 Shrub land	乔木林地 Arboreal land	梯田 Terrace	坡耕地 Sloping farmland	坝地 Dam land	建筑用地 Construction land	水域 Water	转出总计 Roll-out in total
草地 Grassland	27.171	27.680	30.927	1.318	0.468	3.287	0.350	—	64.03 0
灌木林地 Shrub land	3.875	4.779	2.909	0.005	—	—	—	—	6.789
乔木林地 Arboreal lands	9.312	11.757	19.297	—	—	0.718	—	—	21.787
梯田 Terrace	1.201	1.471	0.304	6.788	—	0.013	0.129	—	3.119
坡耕地 Sloping farmland	6.044	3.435	2.301	10.999	0.492	1.504	0.486	—	24.768
坝地 Dam land	1.637	1.972	1.666	0.229	—	0.326	—	—	5.504
建设用地 Constructi-on land	2.472	0.089	1.590	0.424	0.062	—	2.286	0.262	4.899
转入总计 Roll-inin total	24.541	46.404	39.697	6.788	0.529	5.521	0.965	0.262	—

### 2.2 土壤有机碳密度变化

2006 年羊圈沟流域表层土壤平均有机碳密度为 10.27 g/m<sup>2</sup>,其中乔木林地>灌木林地>草地>坝地>梯田>坡耕地;2011 年表层 SOC 密度较 2006 年略有所增加,平均值为 11.01 g/m<sup>2</sup>,两年的 SOC 密度空间分布图见表 2,不同地类表层土壤碳密度两年间的变化情况见表 3。从羊圈沟流域 SOC 密度变化图(图 3)可知,西北地区表层 SOC 密度以增加为主,其转变用地类型主要为:转变为灌木林地、乔木林地的及保持不变的灌木林地、乔木林地等;而中部及东南地区的地区以减少为主,其转变用地类型主要为转变为及保持不变的坡耕地等。

表 3 2006 年—2011 年羊圈沟流域表层土壤有机碳密度变化(g/m<sup>2</sup>)

Table 3 Changes of the surface Soil Organic Carbon (SOC) density in Yangjuangou watershed from 2006 to 2011

土地利用类型 Land-use type	2006 年有机碳平均密度 Average SOC density in 2006	2011 年有机碳平均密度 Average SOC density in 2011
草地 Grassland	11.05	12.06
灌木林地 Shrub land	9.92	12.50
乔木林地 Arboreal land	11.01	12.80
坡耕地 Sloping farmland	8.34	6.94
梯田 Terrace	9.84	10.12
坝地 Dam land	11.48	11.65
平均值 Mean	10.27	11.01

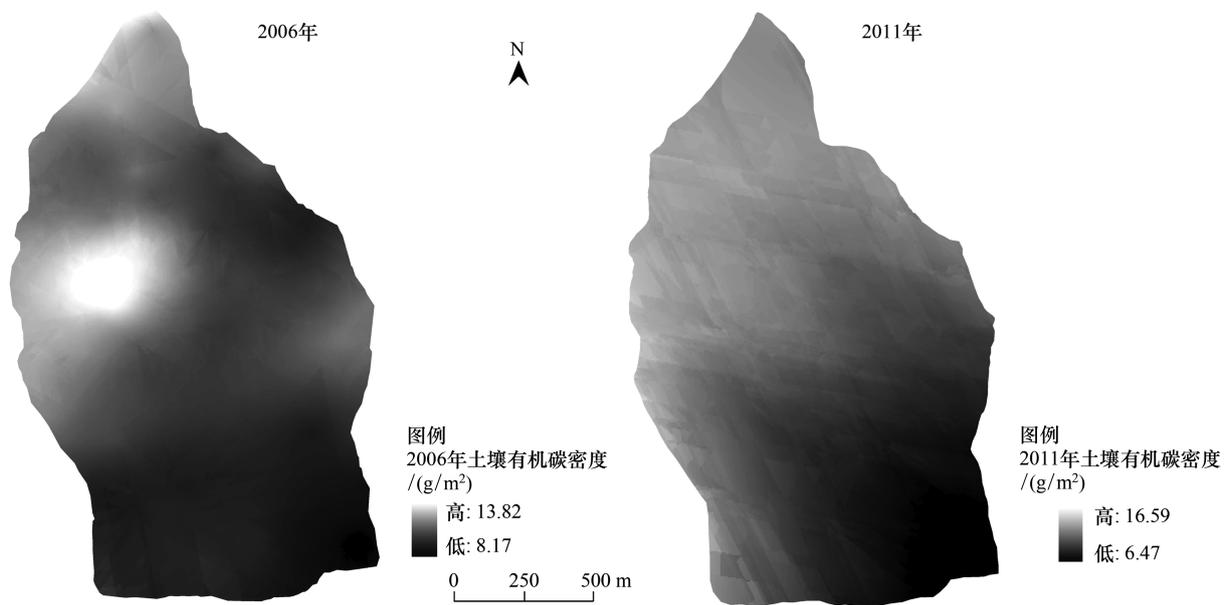


图2 2006年、2011年羊圈沟流域表层土壤有机碳密度图

Fig.2 Surface Soil Organic Carbon (SOC) density in Yangjuangou watershed in 2006 and 2011

### 2.3 土地利用变化对表层土壤有机碳密度及储量的影响

#### 2.3.1 保持用地类型土壤有机碳变化

SOC 储量比较全面地反映了土地利用变化对 SOC 的影响。由于不同土地利用类型 SOC 密度存在着差异,因此 SOC 储量也存在差异<sup>[5]</sup>。由保持利用类型的 SOC 密度及碳储量变化表(表 4)可知:2006—2011 年保持不变的土地利用类型面积 61.852 hm<sup>2</sup>,占整个流域总面积的 30.62%。就 SOC 密度而言,虽然整个流域保持利用类型的 SOC 密度变化较小,但保持不变的草地、灌木林地、乔木林地、梯田及坝地的变化值均为正;而保持坡耕地的变化值均为负。整个流域保持用地类型表层 SOC 储量共增加 211.64 kg,其中坡耕地减少量最多,为-88.25 kg,而乔木林地增加量最多,为 177.53 kg。

#### 2.3.2 转变土地用地类型土壤有机碳变化

转变土地利用类型 SOC 密度及碳储量变化情况如下:羊圈沟流域从 2006 到 2011 年,转变用地类型面积 1.25×10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>,占羊圈沟流域总面积的 63.79%,转变土地利用类型的表层 SOC 密度的变化区间为-0.08—0.14 g/m<sup>2</sup>。从有机碳密度来看,转入为灌木林地、乔木林地及梯田的类型,有机碳密度多为增加,而转为坡耕地的均减少。

整个流域转变用地类型的 SOC 储量增加 587.25 kg,其中草地转出类型增加的土壤表层有机碳储量最多,为 441.64 kg;灌木林地转出类型减少的土壤表层有

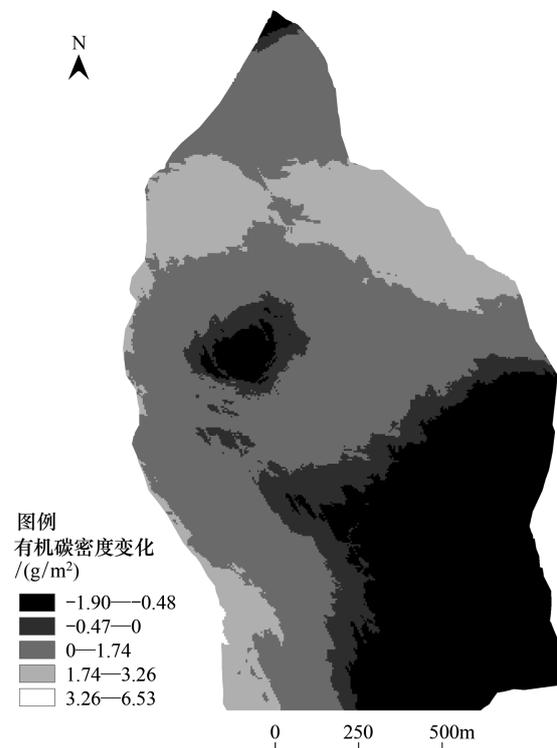


图3 2006年—2011年羊圈沟流域表层土壤有机碳密度空间格局变化

Fig.3 Spatial changes of the surface SOC density in Yangjuangou watershed from 2006 to 2011

机碳储量最多,为-21.01 kg。

表 4 2006 年至 2011 年保持用地类型土壤有机碳密度、储量变化表

Table 4 SOC density and storage change on different land-use types from 2006 to 2011

保持用地类型 Maintained land use types	面积 Area/m <sup>2</sup>	碳密度最小 变化值 Minimum SOC density variation/ (g/m <sup>2</sup> )	碳密度最大 变化值 Maximum SOC density variation/ (g/m <sup>2</sup> )	平均有机碳密 度变化值 Average SOC density variation/ (g/m <sup>2</sup> )	有机碳储量 变化值 SOC storage variation/kg
草地 Grassland	271711.17	-1.76	3.56	0.25	67.93
灌木林地 Shrub land	47786.79	-0.53	2.36	0.78	37.27
乔木林地 Arboreal land	192965.24	-1.78	2.73	0.92	177.53
坡耕地 Sloping farmland	67883.10	-2.78	-0.71	-1.30	-88.25
梯田 Terrace	4919.21	-0.91	1.07	0.31	1.52
坝地 Dam land	33255.18	-1.07	1.96	0.47	15.63
合计 In total	618520.69	-	-	0.24	211.64

### 2.3.3 保持和转变用地类型土壤有机碳变化对比分析

将小流域 2006—2011 年保持用地类型表层土壤碳密度的变化值与转变用地类型表层土壤的碳密度变化值进行比较分析发现(图 4),保持用地类型和转变用地类型的表层 SOC 密度均发生显著变化。草地-灌木林地、草地-乔木林地、坡耕地-草地、坡耕地-灌木林地、坡耕地-乔木林地、坡耕地-坝地、梯田-草地、梯田-灌木林地、梯田-乔木林地、梯田-坝地、坝地-草地、坝地-灌木林地、坝地-乔木林地等转换类型表现为表层土壤碳密度增加值高于保持用地类型碳密度的增加值,说明这些地类的转换有利于表层 SOC 储量的增加,即有利于表层

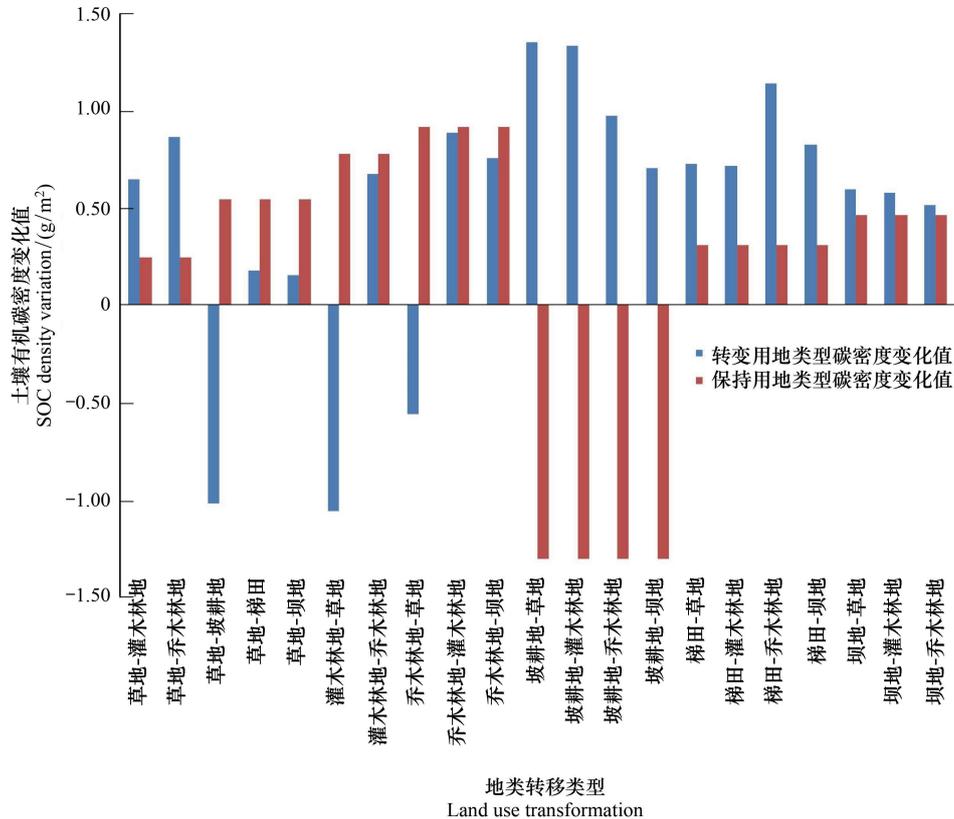


图 4 2006 年至 2011 年转变与保持用地类型有机碳密度变化值比较

Fig.4 Comparison of SOC density change between changed and maintained land use types from 2006 to 2011

土壤碳汇的形成;而其他地类之间的转换表现出转变用地类型的表层土壤碳密度增加值低于保持用地类型碳密度的增加值,说明在这些地类转换过程中造成了表层有机碳的释放,不利于土壤碳汇的形成。

### 3 讨论

#### 3.1 易形成碳汇的土地利用转变方式

研究表明,得益于国家退耕还林政策的实施,羊圈沟小流域的耕地面积明显减少,灌木林地和乔木林地面积显著增加,植被恢复效果明显。通过合理的土地利用方式转变,可以提高土壤有机物质的输入量,减少土壤有机物质的矿化分解,增加 SOC 汇<sup>[21]</sup>。

林地植被覆盖度较高,林下调落物较厚,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,从而使表层 SOC 的密度高于其他用地,坡耕地和草地造林后 SOC 汇的功能强度都将增强<sup>[13]</sup>。因而草地-灌木林地、草地-乔木林地、坡耕地-灌木林地、坡耕地-乔木林地、梯田-灌木林地、梯田-乔木林地、坝地-灌木林地、坝地-乔木林地等转变均有利于土壤表层碳汇的形成。造林作为干旱/半干旱区一种重要的生态恢复手段,已在世界范围引起重视和关注<sup>[7]</sup>。

坝地可以拦截泥沙、流域地表的有机质及其它大量养分。土壤水分充足,则其透气性差,原有机碳分解速率小,外源有机残体在水分作用下易于腐烂降解成有机物质,从而有利于 SOC 密度的提高。坝地在流域的上、中和下游均有分布,黄土高原侵蚀剧烈,降雨侵蚀导致的水沙能在很短的时间内被坝地拦截,泥沙淤积迅速,所以 SOC 被氧化的可能性较小,并搬运到坝地中累积。在流域单元内,淤地坝工程的固碳效应是整个流域固碳的重要方面<sup>[11]</sup>。坡耕地土壤水分不足,土壤孔隙度大,加大有机碳分解速率,不利于 SOC 的积累,因而,坡耕地-坝地的有机碳密度增加。

梯田主要分布在崩坡,其有效地控制了水土流失并承接了来自崩顶的汇水汇沙,因而使处于强烈侵蚀带的崩坡 SOC 密度升高。而坡耕地以果园为主,果园属于经济林,林种单一,凋谢物少,植物残体归还量少,导致碳输入量低,控制水土流失能力以及承接上方泥沙的能力远远低于梯田,因而坡耕地-梯田会使有机碳密度增加<sup>[13, 20]</sup>。

草地主要以自然恢复天然草地为主,大面积分布在崩坡,植被覆盖度较高,且有零星的乔木和灌木植被,有效地减少了土壤侵蚀和水土流失。坡耕地转变为草地 SOC 蓄积量的增加主要来源于高生物量、凋落物留存和高根系生物量<sup>[22]</sup>,因而坡耕地-草地的转变有利于有机碳密度的增加。正如 Gebhart 等<sup>[23]</sup>发现美国中部平原的农地变成草地之后 300 cm 土壤中有有机碳增加 110.0 gC/m<sup>2</sup>yr,该值是最大的增长速率。Lugo 等<sup>[24]</sup>在亚热带湿润森林区的研究证明了农田被草地代替之后,平均积累速率为 33.2 gC/m<sup>2</sup>yr 等。然而草地拦截水土能力弱于林地,天然草地根系分泌物和凋落物输入高于农田和坡耕地(果园)但低于乔木林地和灌木林地<sup>[23-24]</sup>。

#### 3.2 易形成碳源的土地利用转变方式

由于实施退耕还林工程,从 2006 年以来,流域内坡耕地基本消失,仅为 0.23 hm<sup>2</sup>,到 2011 年,原有坡耕地逐渐转换为梯田及灌木林地,但是仍有少量处于坡面的荒草地被开发为耕地,于是出现了少量坡耕地。转变为坡耕地(果园和旱地)从而引起 SOC 损失的机制为:首先由于耕作的物理效应,即耕作破坏了土壤的团聚体结构,使土壤透气性、温度、水分条件得到改善,微生物呼吸作用增强,加速了 SOC 的分解,导致 SOC 的大量释放;其次,开垦使土壤的温度和湿度条件在耕作中得到了改善,在一定程度上促进了土壤的呼吸作用,加速了土壤有机质的分解;另外,收获作物时大量地上部分被移走,从而大大减少了植被对土壤碳的归还量,耕地的烧荒措施也使固定在植被中的碳全部释放到大气中<sup>[22]</sup>。因而草地-坡耕地造成土壤碳密度的减少,应该降低土壤耕作强度,减少土壤呼吸强度,从而达到减少 SOC 消耗的目的<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 有机碳汇的长期效应

本研究中 2006—2011 年小流域尺度土壤碳密度虽整体呈增加趋势,其变化幅度却很小。这是由于

SOC 的累积和恢复是一个长期过程,黄土丘陵区植被恢复应着眼于长期效应,频繁的土地利用变化可能会降低土壤碳截流效果,而长期保持更有利于本区域土壤固存大气中的  $\text{CO}_2$  [25]。随着退耕还林的开展和坝地的增加,从生态系统流失的碳可以通过固碳重新被土壤和植被吸收,从而恢复退化的土壤,增加生态系统碳储量 [26]。由图 5 可知,乔木林地与灌木林地虽均为碳汇 [16],然而互相转换后均造成 SOC 密度的降低,即不利于土壤碳的保持,因而就林地来说,更适合保持不变,转换树种后,由于对土壤进行了扰动,反而造成了碳损失。增加生态系统的碳汇功能应从增加输入量、减少输出量和增加稳定性去实现 [7]。

#### 4 结论

(1) 2006 年到 2011 年,羊圈沟流域土地利用类型发生较大变化,主要集中在乔木林地和灌木林地面积的增加以及荒草地及坡耕地面积的减少。黄土丘陵区植被恢复的土壤固碳效应表现出一定的时空变化规律,对评估本区域植被恢复的 SOC 截流量,以及预测未来 SOC 截流潜力有重要影响。

(2) 土地利用方式的变化会导致 SOC 密度及储量的变化,其中,转变为林地、梯田、坝地等类型的土地利用方式,有利于表层 SOC 储量的增加,应该保留;而转变为坡耕地的类型造成了表层土壤的碳排放,应该引起足够的重视。然而在研究区域内,居民点附近仍出现少量将荒草地开发为坡耕地的现象,因此应加强植被恢复的力度和管理强度,兼顾淤地坝、梯田的维护和建设。

(3) 土壤固碳应着眼于长期效应,频繁的土地利用类型转化可能会降低土壤碳截流效果,黄土丘陵区植被重建的长期利用和保持更有利于 SOC 的积累。在野外条件下开展关于土地利用变化后 SOC 库的研究,可以在最接近自然状况的条件下揭示 SOC 库与土地利用变化相互作用的规律,但会受到土壤异质性及人为频繁扰动的影响,虽然可以通过重复样地和多点采样进行弥补,仍会造成一些变异性和不确定性结果,或会掩盖某些规律性的变化,因此今后研究应辅助以可控性更强的室内模拟试验。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change-with suggestions for studying organic carbon sequestration in paddy soils of China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(3): 100-109.
- [ 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 ] 贺金生, 王政权, 方精云. 全球变化下的地下生态学: 问题与展望. *科学通报*, 2004, 49(13): 1226-1233.
- [ 4 ] 廖晓勇, 陈治谏, 刘邵权, 王海明. 三峡库区小流域土地利用方式对土壤肥力的影响. *生态环境*, 2005, 14(1): 99-101.
- [ 5 ] 李正才, 徐德应, 傅懋毅, 孙雪忠, 奚金荣. 北亚热带土地利用变化对土壤有机碳垂直分布特征及储量的影响. *林业科学研究*, 2007, 20(6): 744-749.
- [ 6 ] Zhang Q, Wang L, Ji R R, Yang Z P, Zhang J J. Effects of land use on soil quality on the Loessplateau in North-West Shanxi Province. *Computer and Computing Technologies in Agriculture II, Volume 1*. Springer US, 2009. 375-385.
- [ 7 ] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1): 9-20.
- [ 8 ] Liu G B, Xu M X, Ritsema C. A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly, gullied area on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 2003, 54(1/2): 31-44.
- [ 9 ] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, 85(1): 58-66.
- [ 10 ] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价. *中国工程科学*, 2003, 5(9): 65-71, 77-77.
- [ 11 ] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵区沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 443-453.
- [ 12 ] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 15 ] 刘孝义. 土壤物理及土壤改良研究法. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 20-51.
- [ 16 ] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 李琪, 齐鑫, 马岩. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响——以北京市延庆盆地为例. *生态学报*, 2006, 26(10): 3198-3204.

- [17] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, Mcgilvray H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, 8(2): 105-123.
- [18] Schiffman P M, Johnson W C. Phytomass and detrital carbon storage during forest regrowth in the southeastern United States Piedmont. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(1): 69-78.
- [19] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 黄勇. 基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例. *生态学报*, 2013, 33(19): 6389-6397.
- [20] 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.
- [21] 王健波, 李银生, 邱江平, 林琪, 王秀红, Forest F, Boulaki S, Séguy L. 崇明岛典型土地利用方式对土壤有机碳和酶活性的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1850-1854.
- [22] 汪艳林, 许信旺, 曹志红. 土地利用和覆盖变化对土壤碳库的影响. *池州学院学报*, 2008, 22(5): 83-88.
- [23] Gebhart D L, Johnson H B, Mayeux H S, Polley H W. The CRP increases soil organic carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 49(5): 488-492.
- [24] Lugo A E, Sanchez M J, Brown S. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil*, 1986, 96(2): 185-196.
- [25] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, Lv Y H, Gao Y. Check dam in the Loess Plateau of China: engineering for environmental services and food security. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(24): 10298-10299.
- [26] 高扬, 何念鹏, 汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展. *自然资源学报*, 2013, 28(7): 1264-1274.