

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.001

基于 FD 和 ESM 法的黄土丘陵区典型流域 土壤碳氮含量及储量研究

宇 涛, 李占斌, 李 鹏, 肖 列

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为准确估算黄土丘陵区典型流域土壤有机碳氮储量, 基于网格法在王茂沟流域挖掘 202 个土壤剖面, 分层采集了 0~100 cm 土层土壤样品, 以土地利用方式为基本单元, 基于固定深度法 (FD) 和等效质量法 (ESM) 分析了王茂沟流域不同土地利用方式下土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 储量特征。结果表明: 流域内坡耕地转变为梯田、林地和草地后, 0~20 cm 土层 SOC 和 TN 含量均呈增加趋势, 但增加量没有达到显著水平; 坝地各土层 SOC 含量略小于坡耕地, 但 20~100 cm 各土层 TN 含量显著高于坡耕地。基于 FD 法和 ESM 法的计算结果均表明, 坡耕地转变为林地和草地后, SOC 和 TN 储量均呈明显增加趋势, 坝地 SOC 储量与坡耕地无显著差异, TN 储量显著高于坡耕地。FD 法计算的王茂沟流域总 SOC 和 TN 储量分别为 694.97 Mg 和 24.18 Mg, 而 ESM 法计算的流域总 SOC 和 TN 储量分别为 665.03 Mg 和 23.30 Mg, FD 法高估了流域总 SOC 和 TN 储量。该研究表明, 退耕还林(草)可以在一定程度上提高土壤 SOC 和 TN 储量, 坝地具有较高的土壤 SOC 和 TN 储量, 尤其是 TN 储量。未来估算流域不同土地利用方式土壤碳氮储量时, 应考虑计算方法对结果的影响。

关键词: 黄土丘陵区; 生态建设; 土地利用变化; 土壤有机碳储量; 土壤全氮储量

中图分类号: S157.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)01-0001-09

Soil organic carbon and nitrogen content and storage in a typical watershed in the hilly area of the Loess Plateau based on FD and ESM method

YU Tao, LI Zhanbin, LI Peng, XIAO Lie

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to accurately estimate the soil organic carbon and nitrogen storage in the typical watershed in the hilly area of the Loess Plateau, 202 soil profiles were collected at 20 cm intervals down to a depth of 100 cm in the Wangmaogou watershed. Based on the fixed depth method (FD) and the equivalent mass method (EMS), we explored the soil organic carbon and nitrogen content and storage in different land use types in the Wangmaogou watershed. The results showed that the SOC and TN content in the 0~20 cm depth increased after cropland was converted to terrace, grassland and forestland, but the increase was no of significance. The SOC content in dam land at each soil depth was lower than that in the slope cropland, and the TN content in 20~100 cm depth was significantly higher than that in the sloped cropland. According to the FD and ESM method, the SOC and TN storage increased obviously after cropland was converted to grassland and forestland. The SOC storage in the dam land had no significant difference with cropland, while the TN storage was significantly higher than that of the cropland. The total SOC

收稿日期: 2019-10-09; 网络出版日期: 2020-04-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20200421.1259.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402404); 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队资助项目(2018TD-037)

第一作者: 宇涛, 男, 博士生, 研究方向为水土保持、生态修复与环境保护。E-mail: 2214060767@qq.com

通信作者: 李占斌, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zhanbinli@126.com

and TN storage in the watershed calculated based on the FD method were 694.97 Mg and 24.18 Mg, respectively. And the total SOC and TN storage calculated based on the ESM method were 665.03 Mg and 23.30 Mg, respectively. The total SOC and TN storage was overestimated by the FD method. The present research indicated that sloped cropland converted to grassland and forestland could increase the SOC and TN storage in some extent, and that dam land had relatively high SOC and TN storage, especially for TN storage. It is suggested that the calculation method should be considered in evaluating the impact of land use change of SOC and TN storage in the future research.

Key words: hilly and gully area; ecological construction; land use change; soil organic carbon storage; soil total nitrogen storage

近年来,不合理的土地利用方式和化石燃料的大量燃烧导致的二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体的大量排放,是驱动全球气候变暖的主要原因^[1-2]。土壤作为陆地生态系统最重要的碳库和氮库,在全球生态系统碳氮循环过程中发挥着重要作用。合理的土地利用方式转变可以有效提高土壤碳氮储量,改善土壤肥力状况,减缓全球气候变暖的趋势^[3]。因此,研究不同土地利用方式对土壤碳氮含量和储量特征的影响,对有效指导区域土地资源合理利用和生态环境建设具有重要意义。

土地利用方式的转变能够改变生态系统植物种类的组成和群落结构,通过影响凋落物、根系分泌物等质和量的输入和土壤微生物群落特征,导致土壤碳氮储量的变化^[4-5]。目前,众多科研工作者对黄土高原区^[6-8]、东北黑土区^[9]、黄淮海平原区^[10]、北方农牧交错带^[11-12]、南方红壤丘陵区^[13]、西南喀斯特石漠化地区^[14-15]等不同土地利用方式下土壤碳氮含量及储量特征进行了研究。研究结果表明,土地利用方式显著改变了土壤剖面有机碳、全氮含量和储量,而且林地、灌木地和草地的土壤碳氮储量通常高于农田地^[6,16]。目前,对剖面土壤碳氮储量的估算有固定深度法(fixed depth, FD)、等效质量法(equivalent soil mass, ESM)等。FD法是进行碳氮储量计算时广泛采用的方法,但近年来的研究表明,FD法忽略了不同土地利用方式之间土壤容重的差异造成的土壤质量的变化,从而导致土壤碳氮储量估算产生偏差;而等效质量法,考虑了不同处理间土壤容重的差异,有利于提高土地利用方式变化条件下土壤碳氮储量的估算精度^[17-18]。Lee等^[17]和Xu等^[19]研究表明,ESM法较FD法更能准确反映不同耕作措施对土壤有机碳储量的影响。全金辉等^[20]对广西喀斯特区不同土地利用方式土壤有机碳和全氮储量进行了研究,发现FD法高估或者低估了土壤有机碳和全氮储量,建议采用ESM方法测算土地利用变化对SOC和TN储量的影响。此外,由于

土壤具有较大的空间异质性,基于点位尺度的土壤有机碳氮储量研究结果难以用来表征全流域土壤有机碳氮储量^[6, 21-22]。然而,目前对全流域不同土地利用方式下土壤碳氮储量的研究还相对较少,尤其是基于FD法和ESM法对比分析流域土壤碳氮储量特征差异的研究还鲜见报道。

黄土高原自实施退耕还林(草)工程以来,大量坡耕地退耕转变为林地、草地,在沟道内修建淤地坝,拦泥淤地,有效减少了流域水土流失量。大量研究表明,黄土高原的生态环境建设显著提高了土壤碳氮储量^[7,23]。但是,由于黄土高原沟壑纵横,地形破碎,加上土壤中碳氮分布的空间异质性,导致不同研究结果估算的土壤碳氮储量存在很大差异^[6,24-25],而且对于土壤碳氮储量的计算,并没有考虑土地利用方式转变后土壤容重差异导致的土壤质量变化。因此,系统研究流域不同土地利用方式下土壤有机碳氮在土壤剖面的分布特征,对比分析基于FD法和ESM法估算的流域土壤有机碳氮储量的差异,对科学评估流域不同生态建设措施的碳汇效应具有重要意义。本文以黄土丘陵区典型流域王茂沟为研究对象,通过网格法进行流域土壤剖面样品的采集,基于FD和ESM两种方法对流域土壤有机碳氮储量特征进行了分析,探讨不同土地利用方式对土壤有机碳和全氮储量的影响以及FD和ESM法对估算流域土壤碳氮储量的影响,以期优化黄土高原地区土地利用和生态建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省绥德县东南5 km处的王茂沟流域(37°34'13"~37°36'03" N, 110°20'26"~110°22'46" E),是无定河左岸的一条支沟。流域面积5.97 km²,海拔介于936 m~1188 m之间。流域主沟道长度为3.75 km,沟道平均坡降为2.7%。

该区属于大陆性季风气候,多年平均气温为 10℃,多年平均降水量为 513 mm,存在明显的旱季和雨季,雨季(7~9月)降水量占年平均降水量的 60%以上。土壤类型主要为黄绵土,极易发生土壤侵蚀。

自 1950s 以来,为减少土壤侵蚀,改善生态环境,黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站在王茂沟流域开展了大量的沟道和坡面治理工程。国家自 1999 年以来,实施大规模的退耕还林(草)政策,该区大量坡耕地撂荒转变为天然草地或种植人工林。截至目前,该流域主要土地利用类型为坡耕地(22.32%)、林地(9.15%)、草地(36.51%)、梯田(25.78%)和坝地(6.24%)^[26]。

1.2 土壤样品的采集和测定

为揭示流域土地利用变化对土壤有机碳和全氮含量及其储量的影响,本研究采用网格法在流域内进行土壤样品的采集。根据流域内不同土地利用方式的分布,结合地形、坡位等因素,采用非等间距不规则网格布点法在全流域布设 202 个采样点,其中,坡耕地 20 个、林地 34 个、草地 103 个、梯田 29 个、坝地 16 个。在每个采样点用直径约 7 cm 的土钻分层采集 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 的土壤样品,重复 3 次。采集的土壤样品放入自封袋内带回实验室,风干后过 0.25 mm 筛用于土壤有机碳和全氮含量的测定。土壤有机碳含量采用 TOC 分析仪(multi N/C 3100, Analytik Jean AG, Germany)测定,土壤全氮含量采用凯氏定氮仪(Kjeltec 8400, Foss, Denmark)测定。在采集土壤样品的同时,采用环刀分层采集不同土地利用方式的土壤样品,采用烘干法测定土壤容重。

1.3 土壤碳氮储量计算

土壤有机碳和全氮的储量采用固定深度法(FD)和等效质量法(ESM)两种方法计算^[20]:

1) FD 法计算公式为:

$$STO_{FD} = \sum_{i=1}^n con_i \times BD_i \times H_i \times 0.1 \quad (1)$$

式中: STO_{FD} 为某一固定深度土壤有机碳或全氮的储量, Mg/hm^2 ; i 为土层编号; n 为土壤剖面土层数; con_i 为第 i 层土壤有机碳或全氮含量, g/kg ; BD_i 为第 i 层土壤的容重, g/cm^3 ; H_i 为第 i 层土壤的深度; 0.1 为转换系数。

2) ESM 法计算碳氮储量,首先计算固定深度土壤的质量:

$$M_{soil} = \sum_{i=1}^n BD_i \times H_i \times 100 \quad (2)$$

式中: M_{soil} 为某一固定深度土壤质量, Mg/hm^2 ; 100

为转换系数。

然后,从每个土壤深度选取不同土地利用方式中最轻的土壤质量作为参考质量^[17],计算多余的土壤质量:

$$M_{ex} = M_{soil} - M_{ref} \quad (3)$$

式中: M_{ex} 为多余的土壤质量, Mg/hm^2 ; M_{ref} 为参考土壤质量, Mg/hm^2 。

最后,计算等效质量下土壤有机碳、全氮储量:

$$STO_{ESM} = STO_{FD} - M_{ex} \times con_{sn} \times 0.001 \quad (4)$$

式中: STO_{ESM} 为等效质量的土壤有机碳或全氮的储量, Mg/hm^2 ; con_{sn} 为最深层土壤有机碳或全氮的含量, g/kg ; 0.001 为转换系数。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件进行数据的处理和分析。表中数据采用平均值±标准差的形式来表示。采用单因素方差分析研究不同土地利用方式和不同土层深度土壤有机碳、全氮含量及其储量的差异,并用 Duncan's multiple range test 检验不同处理间差异的显著性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤有机碳含量和储量特征

坡耕地转变为梯田、草地和林地后,0~20 cm 土层有机碳含量分别提高 7.23%、11.01% 和 12.35%,但增加量并没有达到显著水平,如表 1 所示。20~100 cm 土层有机碳含量均呈不同程度的增加或减少,变化量没有达到显著水平。与坡耕地相比,坝地各土层有机碳含量均略小于坡耕地。土层深度对土壤有机碳含量有显著影响($P < 0.05$)。坡耕地和梯田土壤有机碳含量随土层深度增加略有降低,到 80~100 cm 土层有机碳含量略有提高。草地、林地和坝地土壤有机碳含量均表现为 0~20 cm 土层有机碳含量显著高于其他土层($P < 0.05$)。

基于 FD 法和 ESM 法的计算结果均表明,坡耕地转变为梯田、草地和林地后,各土层有机碳储量均未发生显著变化,如表 2 和表 3 所示。基于 FD 法计算的坝地 20~40 cm 土壤有机碳储量显著低于坡耕地,其余各土层有机碳储量均无显著差异。基于 FD 法和 ESM 法计算的土壤有机碳储量均表现为,坡耕地和梯田土壤有机碳储量随土层深度增加无显著变化,林地和坝地 0~20 cm 土层有机碳储量显著高于其他土层。基于 FD 法计算的草地土壤有机碳储量随土层深度无显著变化,基于 ESM 法计算的草地土壤有机碳储量随土层深度增加呈波动性变化。

表 1 不同土地利用方式土壤有机碳含量特征

Tab. 1 Soil organic carbon content under different land use types

土层深度/ cm	土壤有机碳含量/(g · kg ⁻¹)				
	坡耕地	梯田	草地	林地	坝地
0~20	8.99±2.39 ^{aA}	9.64±2.01 ^{aA}	9.98±2.02 ^{aA}	10.10±2.67 ^{aA}	8.83±1.74 ^{aA}
20~40	8.93±2.49 ^{aA}	8.89±2.11 ^{abA}	8.81±2.45 ^{bA}	8.72±1.81 ^{bA}	7.78±0.89 ^{bA}
40~60	8.58±2.14 ^{aA}	7.87±2.50 ^{abA}	8.82±2.43 ^{bA}	8.47±2.35 ^{bA}	7.64±0.76 ^{bA}
60~80	8.29±2.40 ^{aA}	7.72±2.07 ^{bA}	8.34±2.36 ^{bA}	8.41±2.31 ^{bA}	7.28±1.04 ^{bA}
80~100	8.81±2.18 ^{aAB}	9.16±3.16 ^{abA}	8.48±2.33 ^{bAB}	8.68±2.43 ^{bAB}	7.51±0.95 ^{bB}

注:不同小写字母表示同一土地利用方式不同土层深度之间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一土层深度不同土地利用方式之间差异显著($P<0.05$),下同。

表 2 基于 FD 法不同土地利用方式土壤有机碳储量

Tab. 2 Soil organic carbon storage under different land use types by FD method

土层深度/ cm	土壤有机碳储量/(Mg · hm ⁻²)				
	坡耕地	梯田	草地	林地	坝地
0~20	23.20±6.17 ^{aA}	24.68±5.14 ^{aA} (1.48)	25.16±5.09 ^{aA} (1.95)	25.64±6.79 ^{aA} (2.44)	24.20±4.78 ^{aA} (0.99)
20~40	24.29±6.76 ^{aA}	24.00±5.71 ^{aA} (-0.30)	23.80±6.62 ^{aA} (-0.49)	22.33±4.63 ^{bA} (-1.96)	18.20±2.08 ^{bB} (-6.09)
40~60	22.66±5.65 ^{aAB}	21.08±6.69 ^{aAB} (-1.58)	24.71±6.82 ^{aA} (2.05)	22.37±6.21 ^{bAB} (-0.29)	20.33±2.01 ^{bB} (-2.33)
60~80	21.88±6.33 ^{aAB}	20.69±5.55 ^{aAB} (-1.19)	23.36±6.61 ^{aA} (1.49)	22.20±6.10 ^{bAB} (0.32)	19.38±2.75 ^{bB} (-2.50)
80~100	23.25±5.75 ^{aAB}	24.55±8.46 ^{aA} (1.30)	23.75±6.53 ^{aAB} (0.51)	22.91±6.41 ^{bAB} (-0.34)	19.99±2.52 ^{bB} (-3.26)
0~100	115.28±23.35 ^{AB}	114.99±21.95 ^{AB} (-0.29)	120.78±22.85 ^A (5.50)	115.45±22.08 ^{AB} (0.17)	102.08±8.02 ^B (-13.19)

注:括号中的数字表示坡耕地转变为其他土地利用方式后各土层土壤有机碳储量的增量。

表 3 基于 ESM 法不同土地利用方式土壤有机碳储量

Tab. 3 Soil organic carbon storage under different land use types by ESM method

土层深度/ cm	土壤有机碳储量/(Mg · hm ⁻²)				
	坡耕地	梯田	草地	林地	坝地
0~20	22.68±6.17 ^{aA}	24.32±5.14 ^{aA} (1.64)	25.16±5.09 ^{aA} (2.48)	25.47±6.79 ^{aA} (2.79)	22.54±4.78 ^{aA} (-0.13)
20~40	20.94±6.76 ^{aA}	20.70±5.71 ^{aA} (-0.25)	20.74±6.62 ^{cA} (-0.20)	20.42±4.63 ^{bA} (-0.52)	18.20±2.08 ^{bA} (-2.74)
40~60	22.66±5.65 ^{aA}	20.71±6.69 ^{aA} (-1.95)	23.35±6.82 ^{bA} (0.69)	22.37±6.21 ^{bA} (-0.29)	20.18±2.01 ^{bA} (-2.48)
60~80	21.88±6.33 ^{aA}	20.32±5.55 ^{aA} (-1.56)	22.01±6.61 ^{bcA} (0.13)	22.20±6.10 ^{bA} (0.32)	19.23±2.75 ^{bA} (-2.65)
80~100	23.25±5.75 ^{aAB}	24.18±8.46 ^{aA} (0.94)	22.40±6.53 ^{bcAB} (-0.85)	22.91±6.41 ^{bAB} (-0.34)	19.83±2.52 ^{bB} (-3.41)
0~100	111.40±23.35 ^A	110.23±21.95 ^A (-1.17)	113.66±22.85 ^A (2.26)	113.37±22.08 ^A (1.97)	99.98±8.02 ^A (-11.42)

注:括号中的数字表示坡耕地转变为其他土地利用方式后各土层土壤有机碳储量的增量。

基于 FD 法计算的土壤有机碳储量在不同土地利用方式间表现为草地显著高于坝地,其他土地利用方式之间无显著差异;而基于 ESM 法计算的土壤有机碳储量在不同土地利用方式之间无显著差异。

2.2 不同土地利用方式土壤全氮含量和储量特征

土地利用方式对土壤全氮含量有显著影响 ($P<0.05$),如表 4 所示。坡耕地转变为梯田、草地和林地后,0~20 cm 土层全氮含量分别增加 2.70%、27.03%和 24.32%,草地全氮含量增加量达到显著水平。20~100 cm 土层全氮含量也呈增加趋势,但增加量没有达到显著水平。与坡耕地相比,坝地 20~100 cm 土层全氮含量显著高于坡耕地。土层深度对土壤全氮含量有显著影响 ($P<0.05$)。坡耕地、草地和林地 0~20 cm 土层全氮含量显著高于其他土层,而

梯田地 0~20 cm 和 20~40 cm 土层全氮含量显著高于 40 cm 以下土层。坝地不同土层全氮含量无显著变化。

除 0~20 cm 草地外,坡耕地转变为梯田、草地和林地后,各土层全氮储量均未发生显著变化,如表 5 和表 6 所示。与坡耕地相比,基于 FD 法计算的梯田、林地和草地 20 cm 以下土层和 0~100 cm 土壤全氮储量与坡耕地无显著差异;基于 ESM 法计算的梯田、林地和草地各土层和 0~100 cm 土壤全氮储量与坡耕地均无显著差异。坝地各土层全氮储量显著高于坡耕地。基于 FD 法和 ESM 法计算的土壤剖面全氮储量呈现相同的趋势,均表现为随土层深度的增加呈逐渐降低的趋势,其中,坡耕地、草地和林地 0~20 cm 土层全氮储量显著高于 20 cm 以下土层。坝地各土层全氮储量无显著差异。

表 4 不同土地利用方式土壤全氮含量特征
Tab. 4 Soil total nitrogen content under different land use types

土层深度/ cm	土壤全氮含量/(g · kg ⁻¹)				
	坡耕地	梯田	草地	林地	坝地
0~20	0.37±0.08 ^{aB}	0.38±0.11 ^{aB}	0.47±0.15 ^{aA}	0.46±0.16 ^{aAB}	0.44±0.14 ^{aAB}
20~40	0.28±0.10 ^{bB}	0.33±0.09 ^{aB}	0.31±0.12 ^{bB}	0.30±0.09 ^{bB}	0.44±0.13 ^{aA}
40~60	0.26±0.08 ^{bB}	0.26±0.10 ^{bB}	0.28±0.15 ^{bcB}	0.26±0.06 ^{bcB}	0.42±0.12 ^{aA}
60~80	0.23±0.03 ^{bB}	0.23±0.08 ^{bB}	0.28±0.15 ^{bcB}	0.25±0.07 ^{bB}	0.39±0.15 ^{aA}
80~100	0.23±0.06 ^{bB}	0.23±0.10 ^{bB}	0.26±0.10 ^{cb}	0.26±0.09 ^{bcB}	0.41±0.12 ^{aA}

表 5 基于 FD 法不同土地利用方式土壤全氮储量
Tab. 5 Soil total nitrogen storage under different land use types by FD method

土层深度/ cm	土壤全氮储量/(Mg · hm ⁻²)				
	坡耕地	梯田	草地	林地	坝地
0~20	0.95±0.20 ^{aC}	0.97±0.29 ^{aBC} (0.01)	1.19±0.37 ^{aAB} (0.23)	1.16±0.40 ^{aABC} (0.21)	1.20±0.38 ^{aA} (0.25)
20~40	0.76±0.26 ^{bB}	0.88±0.23 ^{aAB} (0.12)	0.83±0.33 ^{bB} (0.07)	0.75±0.23 ^{bB} (-0.01)	1.02±0.31 ^{aA} (0.25)
40~60	0.68±0.20 ^{bcB}	0.70±0.26 ^{bB} (0.01)	0.77±0.43 ^{bB} (0.09)	0.70±0.15 ^{bB} (0.01)	1.12±0.31 ^{aA} (0.43)
60~80	0.63±0.08 ^{cB}	0.62±0.21 ^{bB} (-0.01)	0.76±0.42 ^{bB} (0.13)	0.66±0.18 ^{bB} (0.03)	1.04±0.40 ^{aA} (0.41)
80~100	0.6±0.14 ^{cB}	0.61±0.26 ^{bB} (0.01)	0.73±0.27 ^{bB} (0.13)	0.69±0.24 ^{bB} (0.09)	1.10±0.31 ^{aA} (0.50)
0~100	3.63±0.49 ^B	3.78±0.87 ^B (0.15)	4.28±1.41 ^B (0.65)	3.96±0.80 ^B (0.33)	5.47±1.51 ^A (1.84)

注:括号中的数字表示坡耕地转变为其他土地利用方式后各土层土壤全氮储量的增加量。

表 6 基于 ESM 法不同土地利用方式土壤全氮储量
Tab. 6 Soil total nitrogen storage under different land use types by ESM method

土层深度/ cm	土壤全氮储量/(Mg·hm ⁻²)				
	坡耕地	梯田	草地	林地	坝地
0~20	0.94±0.20 ^{aB}	0.96±0.29 ^{aB} (0.02)	1.19±0.37 ^{aA} (0.03)	1.16±0.40 ^{aAB} (0.22)	1.11±0.38 ^{aAB} (0.17)
20~40	0.68±0.26 ^{bB}	0.80±0.23 ^{abB} (0.12)	0.74±0.33 ^{bB} (0.04)	0.70±0.23 ^{bB} (0.02)	1.02±0.31 ^{aA} (0.34)
40~60	0.68±0.20 ^{bB}	0.69±0.26 ^{bcB} (0.00)	0.73±0.43 ^{bB} (0.03)	0.70±0.15 ^{bB} (0.01)	1.11±0.31 ^{aA} (0.43)
60~80	0.63±0.08 ^{bB}	0.61±0.21 ^{cB} (-0.02)	0.72±0.42 ^{bB} (0.06)	0.66±0.18 ^{bB} (0.03)	1.03±0.40 ^{aA} (0.40)
80~100	0.60±0.14 ^{bB}	0.60±0.26 ^{cB} (0.00)	0.68±0.27 ^{bB} (0.00)	0.69±0.24 ^{bB} (0.09)	1.09±0.31 ^{aA} (0.49)
0~100	3.53±0.49 ^B	3.66±0.87 ^B (0.13)	4.06±1.41 ^B (0.17)	3.89±0.80 ^B (0.36)	5.35±1.51 ^A (1.82)

注:括号中的数字表示坡耕地转变为其他土地利用方式后各土层土壤全氮总储量的增加量。

2.3 FD 和 ESM 方法对流域土壤碳氮总储量的影响

在计算王茂沟流域不同土地利用方式土壤有机碳和全氮储量时,FD 方法忽略了土地利用方式改变造成的土壤容重的差异,导致计算结果较 ESM 方法偏高。结合流域内不同土地利用方式面积,计算流域土壤有机碳和全氮总储量,结果如表 7 和表 8 所示。基于 FD

和 ESM 方法计算的王茂沟流域 0~100 cm 土壤有机碳总储量分别为 694.97 Mg 和 665.03 Mg。相比于 ESM 方法,FD 方法计算的流域有机碳总储量高估了 4.50%。FD 方法计算的王茂沟流域 0~100 cm 土壤全氮总储量为 24.18 Mg,而 ESM 方法计算的总储量为 23.30 Mg,FD 方法计算的全氮总储量高估了 3.78%。

表 7 流域土壤有机碳总储量
Tab. 7 Total storage of soil organic carbon in the small watershed

土地利用方式	面积/km ²	流域有机碳总储量/Mg		差值/Mg
		FD 法	ESM 法	
坡耕地	1.33	153.32±31.06	148.16±31.06	5.16
梯田	1.54	177.08±33.80	169.75±33.80	7.33
草地	2.18	263.3±49.81	247.78±49.81	15.52
林地	0.55	63.5±12.14	62.35±12.14	1.15
坝地	0.37	37.77±2.97	36.99±2.97	0.78
总计	5.97	694.97±129.78	665.03±129.78	29.94

表 8 流域土壤全氮总储量
Tab. 8 Total storage of soil total nitrogen in the small watershed

土地利用方式	面积/km ²	流域全氮总储量/Mg		差值/Mg
		FD 法	ESM 法	
坡耕地	1.33	4.83±0.65	4.69±0.65	0.14
梯田	1.54	5.82±1.34	5.64±1.34	0.18
草地	2.18	9.33±3.07	8.85±3.07	0.48
林地	0.55	2.18±0.44	2.14±0.44	0.04
坝地	0.37	2.02±0.56	1.98±0.56	0.04
总计	5.97	24.18±6.06	23.30±6.06	0.88

3 讨 论

植被恢复是修复脆弱生态系统,提高土壤碳氮储量的有效措施^[8,27]。坡耕地转变为林地或草地后,植被枯落物和根系死亡周转会导致更多的碳氮输入到土壤中,同时植被恢复显著降低了土壤侵蚀造成的土壤碳氮流失,尤其是表层土壤^[6-7]。因此,本研究结果表明,王茂沟流域内坡耕地转变为草地和林地后,0~20 cm 土层有机碳和全氮含量显著提高,0~100 cm 土层有机碳和全氮储量也明显增加,这与Fu等^[28]和Fang等^[29]的研究结果相一致。本研究估算的流域不同土地利用方式下土壤有机碳储量与刘玉林等^[25]计算的黄土高原子午岭林区人工油松林0~100 cm 土层土壤有机碳储量相当(117.94 Mg/hm²),显著低于东北黑土区^[9]林地和草地0~100 cm 土层土壤有机碳储量(分别为219.50 Mg/hm²和228.20 Mg/hm²),高于西南喀斯特石漠化地区^[14]林地和草地0~100cm 土层土壤有机碳储量(分别为79.1 Mg/hm²和80.7 Mg/hm²)。估算的流域土壤全氮储量与Zhang等^[6]计算的黄土高原纸坊沟流域坡耕地和天然草地0~100cm 土层土壤全氮储量相当(分别为4.00 Mg/hm²和4.30 Mg/hm²),显著低于刘玉林等^[25]计算的黄土高原子午岭林区人工油松林和天然草地0~100cm 土层土壤全氮储量(分别为7.69 Mg/hm²和6.33 Mg/hm²)。这说明黄土高原地区的生态建设对提高土壤碳固存具有重要意义,同时,也进一步说明在进行区域土壤碳氮储量计算时,要考虑土壤空间异质性造成的差异。

淤地坝是黄土高原地区保持水土的重要沟道措施,大量研究表明,沟道淤地坝通过拦蓄泥沙,减少土壤流失,显著提高流域土壤碳氮固存。坝地中部分土壤来源于林地和草地表层土壤,其不仅具有较高的碳氮含量,同时具有较高的土壤碳氮稳定性^[30-31]。Zhang等^[32]研究表明,坝地较高的水分含量以及泥沙沉积的压实作用显著降低了坝地土壤中的氧气含量,导致坝地有机碳矿化速率显著低于坡耕地。因此,本研究中坝地土壤有机碳含量显著高于坡耕地。但是,Liu等^[33]研究发现,黄土高原典型坝控流域内坝地土壤有机碳含量显著低于坡耕地,并将其原因归结为坝地土壤的再侵蚀和矿化作用^[34-35]。土壤有机碳氮的储量主要取决于有机物质的输入量和输出量。一般来说,植物枯落物是有机碳的主要输入途径,土壤有机碳矿化分解和侵蚀损失是其主要输出途径,而植物残体的分解、生物固氮和干湿沉降是土壤氮素的主要来源。本研究发现,坝地土壤有机碳储量略低于坡耕地,而全氮储量显著

高于坡耕地,这说明流域内坝地土壤碳氮养分输入以及矿化过程存在显著差异。今后应进一步加强对坝地中土壤碳氮稳定性及其循环转化规律的深入研究。

准确估算流域土壤有机碳和全氮储量,对科学评估生态环境建设和土地合理管理对温室气体的固定效应具有重要意义。土壤有机碳和全氮储量除受土地利用方式、管理措施、土壤质地等因素的影响外,还会受到计算方法的影响。土地利用方式改变通常会导致土壤容重的变化,而土壤容重变化引起的土壤碳氮储量的估算已经引起了大量学者的关注^[17-18]。全金辉等^[20]研究发现,基于FD法和ESM法估算的喀斯特移民区土地利用变化条件下土壤有机碳和全氮储量具有明显差异。本文基于FD和ESM方法计算的流域土壤有机碳和全氮总储量仅相差4.50%和3.78%,但对于准确估算大流域土壤碳氮储量可能会存在一定的偏差。Du等^[36]基于元分析研究了免耕措施对中国土壤有机碳储量年变化率的影响,发现基于FD法计算的土壤有机碳储量年变化率(0.300 Mg/(hm²·a))显著高于ESM法(0.141 Mg/(hm²·a))。Tong等^[37]研究发现,基于FD法计算的黑河流域土地利用变化对土壤有机碳和全氮储量的损失量显著低于ESM法计算的损失量,主要是由于FD法未考虑土地利用变化造成的土壤容重改变。今后在进行不同土地利用方式土壤碳氮储量估算时,应充分考虑不同计算方法造成的差异。同时,建议采用ESM方法来提高土壤碳氮储量估算的精确度。

4 结 论

1) 流域内坡耕地转变为林地和草地后,0~20 cm 土层SOC和TN含量均呈增加趋势,0~100 cm 土层SOC和TN储量明显增加,退耕还林(草)措施在一定程度上提高了土壤碳氮储量。

2) 坝地0~100 cm 土壤TOC储量与坡耕地无显著差异,TN储量显著高于坡耕地,淤地坝建设显著促进了流域碳氮固存。

3) 基于FD和ESM方法计算的流域土壤有机碳和全氮总储量相差4.50%和3.78%。未来估算流域土壤SOC和TN储量时,要考虑容重变化对结果的影响。

参考文献:

- [1] LOPEZ J C, QUIJANO G, SOUZA T S O, et al. Biotechnologies for greenhouse gases (CH₄, N₂O and CO₂) abatement: state of the art and challenges[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(6):

- 2277-2303.
- [2] AL-GHUSSAIN L. Global warming: review on driving forces and mitigation[J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2019, 38(1): 13-21.
 - [3] CAI Z C. Greenhouse gas budget for terrestrial ecosystems in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(2): 173-182.
 - [4] HOYLE F C, DANTUONO M, OVERHEU T, et al. Capacity for increasing soil organic carbon stocks in dryland agricultural systems[J]. *Soil Research*, 2013, 51(7-8): 657-667.
 - [5] 王芳丽,高明,代文才,等. 不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 227-232.
WANG Fangli, GAO Ming, DAI Wencai, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 227-232.
 - [6] ZHANG C, LIU G B, XUE S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 16-24.
 - [7] LI Z W, LIU C, DONG Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the loess hilly-gully region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 1-9.
 - [8] 张祎,李鹏,马田田,等. 黄土高原典型流域“自然-人工”植被对土壤表层碳分布的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2017, 33(4): 443-449.
ZHANG Yi, LI Peng, MA Tiantian, et al. Effects of “nature-artificial” vegetation on surface soil carbon distribution in typical watershed of the Loess Plateau[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2017, 33(4): 443-449.
 - [9] 郝翔翔,韩晓增,李禄军,等. 土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 965-972.
HAO Xiangxiang, HAN Xiaozeng, LI Lujun, et al. Profile distribution and storage of soil organic carbon in a black soil as affected by land use types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 965-972.
 - [10] 李英,韩红艳,王文娟,等. 黄淮海平原不同土地利用方式对土壤有机碳及微生物呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(1): 62-66.
LI Ying, HAN Hongyan, WANG Wenjuan, et al. Effects of different land use types on soil organic carbon and microbial respiration in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(1): 62-66.
 - [11] 徐敏云,李培广,谢帆,等. 土地利用和管理方式对农牧交错带土壤碳密度的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 320-325.
XU Minyun, LI Peiguang, XIE Fan, et al. Response of soil organic carbon density to land-use types and management practices change in agro-pastoral zone[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 320-325.
 - [12] JIAO Y, XU Z, ZHAO J H, et al. Changes in soil carbon stocks and related soil properties along a 50-year grassland-to-cropland conversion chronosequence in an agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2012, 4(4): 420-430.
 - [13] 李忠武,郭旺,王晓燕,等. 南方红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征及其与草本生物量的关系[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 867-874.
LI Zhongwu, GUO Wang, WANG Xiaoyan, et al. Effects of land use type on the distribution of organic carbon in different sized soil particles and its relationships to herb biomass in hilly red soil region of south China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 867-874.
 - [14] 黄先飞,周运超,张珍明. 喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 215-221.
HUANG Xianfei, ZHOU Yunchao, ZHANG Zhenming. Distribution characteristics of soil organic carbon under different land uses in a karst rocky desertification area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 215-221.
 - [15] QIN Y B, XIN Z B, WANG D W, et al. Soil organic carbon storage and its influencing factors in the riparian woodlands of a Chinese karst area[J]. *Catena*, 2017, 153: 21-29.
 - [16] 刘世梁,安南南,杨珏婕,等. 澜沧江中游山地不同土地利用对土壤有机碳的影响及预测[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 981-988.
LIU Shiliang, AN Nannan, YANG Juejie, et al. Effects of different land-use types on soil organic carbon and its prediction in the mountainous areas in the middle reaches of Lancang River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 981-988.
 - [17] LEE J H, HOPMANS J W, ROLSTON D E, et al. Determining soil carbon stock changes: simple bulk density corrections fail[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 134: 251-256.
 - [18] TOLEDO D M, GALANTINI J A, DALURZO H C, et al. Methods for assessing the effects of land use changes on carbon stocks of subtropical oxisols[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77:

- 1542-1552.
- [19] XU S Q, ZHANG M Y, ZHANG H L, et al. Soil organic carbon stocks as affected by tillage systems in a double-cropped rice field[J]. *Pedosphere*, 2013, 13: 696-704.
- [20] 全金辉,胡业翠,杜章留,等. 广西喀斯特移民迁入区土地利用变化对土壤有机碳和全氮储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 2890-2896.
- TONG Jinhui, HU Yecui, DU Zhangliu, et al. Effects of land use change on soil organic carbon and total nitrogen storage in karst immigration regions of Guangxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9): 2890-2896.
- [21] HAN F P, HU W, ZHENG J Y, et al. Estimating soil organic carbon storage and distribution in a catchment of Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3-4): 261-266.
- [22] 薛志婧,马露莎,安韶山,等. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2917-2925.
- XUE Zhijing, MA Lusha, AN Shaoshan, et al. Soil organic carbon density and stock at the catchment scale of a hilly region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2917-2925.
- [23] SHI P, ZHANG Y, LI P, et al. Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 505-512.
- [24] LI M M, ZHANG X C, PANG G W, et al. The estimation of soil organic carbon distribution and storage in a small catchment area of the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2013, 101: 11-16.
- [25] 刘玉林,朱广宇,邓蕾,等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2163-2172.
- LIU Yulin, ZHU Guangyu, DENG Lei, et al. Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2163-2172.
- [26] XU G C, CHENG S D, LI P, et al. Soil total nitrogen sources on dammed farmland under the condition of ecological construction in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 121: 19-25.
- [27] CHEN L D, GONG J, FU B J, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, Loess Plateau of China[J]. *Ecological Research*, 2007, 22(4): 641-648.
- [28] FU X L, SHAO M A, WEI X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, 155(1-2): 31-35.
- [29] FANG X, XUE Z J, LI B C, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2012, 88: 6-13.
- [30] AN S S, MENTLER A, MAYER H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2010, 81(3): 226-233.
- [31] ZHU H H, WU J S, GUO S L, et al. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2014, 120: 64-72.
- [32] ZHANG H C, LIU S G, YUAN W P, et al. Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1449-1455.
- [33] LIU C, LI Z W, DONG Y T, et al. Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China? [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 101: 220-226.
- [34] RHOTON F E, EMMERICH W E, GOODRICH D C, et al. Soil geomorphological characteristics of a semiarid watershed: influence on carbon distribution and transport[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1532-1540.
- [35] BOIX-FAYOS C, DE VENTE J, ALBALADEJO J, et al. Soil carbon erosion and stocks as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 133: 75-85.
- [36] DU Z L, ANGERS D A, REN T S, et al. The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 236: 1-11.
- [37] TONG J H, HU J H, LU Z, et al. The impact of land use and cover change on soil organic carbon and total nitrogen storage in the Heihe River basin: a meta-analysis[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29: 1578-1594.

(责任编辑 周 蓓)