

黄土高原地区基于Meta分析的地形调控土地利用方式转化对土壤有机碳的影响

张彦军¹, 党水纳¹, 任媛媛¹, 邹俊亮^{2*}, 梁 婷¹, 鞠学良³

¹宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西 宝鸡

²北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京

³国网陕西省电力公司电力科学研究院, 电网生态环境保护重点实验室, 陕西 西安

Email: zhangyanjun@bjwlxy.cn, *jlzou@nwafu.edu.cn

收稿日期: 2021年2月15日; 录用日期: 2021年3月16日; 发布日期: 2021年3月24日

摘 要

在地形条件极其复杂的黄土高原地区, 土地利用方式转化和地形位置均是影响土壤有机碳的重要因素, 但是在该区域地形如何调控土地利用方式转化对土壤有机碳的影响目前尚不清楚。本研究综合黄土高原地区土地利用方式转化[农田转化为林地(NW)、农田转化为草地(NG)、农田转化为果园(NO)]和地形位置条件(沟道、塬面、坡地)对土壤有机碳影响的研究论文, 利用Meta分析技术, 研究土地利用方式转化后土壤有机碳在不同地形位置条件下如何分布。研究结果显示: 土地利用方式转化对土壤有机碳影响显著, 基本呈现出NW > NG > NO的趋势, NW、NG和NO导致土壤有机碳的增加量在0~20 cm土层内依次为46.9%、26.5%和6.1%; 在20~40 cm土层, NW条件下土壤有机碳的增加量为34.4%, NG条件下土壤有机碳的增加量为12.3%, NO条件下土壤有机碳的增加量为4.9%; NW、NG和NO在40~100 cm土层内对土壤有机碳的影响不显著。土地利用方式转化后, 土层深度也是影响土壤有机碳的一个重要因素, 土壤有机碳的增加量呈现出随着土层深度的增加而减少的趋势, 且在0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层内, 土壤有机碳分别增加了33%、20.4%和19.7%。此外, 土地利用方式转化后土壤有机碳的增加量基本呈现出沟道大于坡地大于塬面的趋势。在0~20 cm土层, 土壤有机碳的增加量在沟道位置条件下高达59.2%, 在塬面位置条件下仅为17.1%, 而在坡地位置条件下为29.1%; 在20~40 cm土层, 土壤有机碳的增加量在沟道和坡地位置条件下依次为37.1%和24.0%; 在40~100 cm土层, 土壤有机碳的增加量仅在沟道位置条件下影响显著。因此, 在黄土高原地区, 除了土地利用方式和土层深度以外, 地形位置条件也是影响土壤有机碳的一个重要因素。

关键词

土地利用方式转化, 黄土高原, 土壤有机碳, 地形

Effects of Terrain on Soil Organic Carbon in Response to Land-Use Conversion Based on Meta-Analysis in the Loess Plateau

*通讯作者。

文章引用: 张彦军, 党水纳, 任媛媛, 邹俊亮, 梁婷, 鞠学良. 黄土高原地区基于 Meta 分析的地形调控土地利用方式转化对土壤有机碳的影响[J]. 农业科学, 2021, 11(3): 237-248. DOI: 10.12677/hjas.2021.113035

YanJun Zhang¹, Shuina Dang¹, Yuanyuan Ren¹, Junliang Zou^{2*}, Ting Liang¹, Xueliang Ju³

¹Geography and Environmental Engineering Department, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji Shaanxi

²Beijing Research & Development Centre for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing

³Key Laboratory of State Grid Environmental Protection, State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an Shaanxi

Email: zhangyanjun@bjwlxy.cn, *jlzou@nwafu.edu.cn

Received: Feb. 15th, 2021; accepted: Mar. 16th, 2021; published: Mar. 24th, 2021

Abstract

In the Loess Plateau with extremely complex terrain conditions, land-use changes and terrain location are important factors affecting soil organic carbon, but how terrains to regulate the effect of land-use changes on soil organic carbon is still unclear. Our studies collected the papers related to the effects of land-use changes [cropland conversing into woodland (NW), cropland conversing into grassland (NG), cropland conversing into orchard (NO)] and terrain location (gully, tableland, and slope) on soil organic carbon in Loess Plateau for studying the distribution of soil organic carbon under different terrain conditions after land-use changes by using meta-analysis. The results showed that: land-use changes patterns had a significant impact on soil organic carbon, showing a trend of NW > NG > NO. NW, NG and NO increased soil organic carbon by 46.9%, 26.5% and 6.1% in 0~20 cm soil depth; in 20~40 cm soil depth, soil organic carbon increased by 34.4% under NW condition, 12.3% under NG condition and 4.9% under NO condition; the effects of NW, NG and NO on soil organic carbon in 40~100 cm soil depth were not significant. Soil depth was also an important factor affecting soil organic carbon in response to land-use changes, and the increase of soil organic carbon showed a trend of decreasing with the increase of soil depth, with soil organic carbon increasing by 33%, 20.4% and 19.7% in 0~20 cm, 20~40 cm and 40~60 cm soil depths, respectively. In addition, the increase of soil organic carbon in response to land-use changes showed a trend that the increase of soil organic carbon in gullies was greater than that in slope land, and was greater than that in tableland. In the 0~20 cm soil depth, soil organic carbon increased 59.2% in the gully position, 17.1% in the table land position, and 29.1% in the slope position; in the 20~40 cm soil depth, soil organic carbon increased by 37.1% and 24.0% in the gully and slope position, respectively; in the 40~100 cm soil depth, the increase of soil organic carbon was significant only under the gully position. Therefore, in addition to land-use changes and soil depth, terrain location is also an important factor affecting soil organic carbon in the Loess Plateau.

Keywords

Land-Use Changes, Loess Plateau, Soil Organic Carbon, Terrain

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤是陆地生态系统最大的有机碳库, 据估计全球 0~100 cm 土层内的土壤有机碳储量大约为 1500 Gt,

且土壤有机碳库是植被碳库(560 Gt)的 3 倍和大气碳库(760 Gt)的 2 倍[1] [2]。因此,土壤有机碳库的微小变化将会对大气二氧化碳浓度产生显著的影响,进而会对全球气候变化产生重要的影响[3]。大量的研究结果显示,土壤有机碳储量的变化与气候[4]、植被类型或者土地利用方式转化[5] [6]、土壤母质[7]、人类管理措施[8]、地形[9] [10]等因素密切相关。

黄土高原地区,地形破碎、沟壑纵横,水土流失严重,生态环境极其脆弱,为了抑制水土流失和恢复生态环境建设,“七五”期间和 1999 年前后在该区域先后进行了小面积的“小流域综合治理”和大面积“退耕还林还草”工程措施,而这些措施实施以后,黄土高原的植被覆盖率由治理前的 31.6%提高到现在的 65%,水土流失状况和生态环境得到显著的改善[11] [12]。已有的 Meta 分析结果显示,大面积的土地利用方式转变(农田转化为林地和草地)后显著增加了黄土高原地区的土壤有机碳储量[5] [6],但是这些整合分析均没有考虑地形因素对土壤有机碳的制约作用。地形因素是影响土壤有机碳的一个重要因素[10] [13],地形控制着地区的水土流失状况[14] [15],支配着地区水热资源的空间分布[16] [17],决定着地区植被群落的空间配置[18] [19],最终导致不同地形部位的土壤有机碳储量差异显著[9] [10] [13]。因此,不考虑地形因素对土壤有机碳储量的制约作用将会高估或者低估复杂地区的土壤有机碳储量[10] [13],这对准确估算复杂地形条件下的土壤有机碳储量具有重要的限制意义。在黄土高原地区,目前虽然已有大量的研究探究地形因素或者土地利用方式转化亦或二者交互作用对土壤有机碳的影响[9] [20] [21],但是至今没有研究综合考虑地形因素如何调控土地利用方式转化对土壤有机碳的影响,而这对准确理解黄土区的土壤有机碳储量具有重要的现实意义。基于此,本研究收集了黄土高原地区有关土地利用方式转化-地形因素-土壤有机碳含量之间相互关系的科研论文,利用 Meta 分析进一步探讨地形因素如何调控土地利用方式转化对土壤有机碳的影响,以期为准理解地形复杂地区的陆地生态系统碳循环理论提供重要的理论支撑和现实意义。

2. 材料方法

2.1. 数据的收集

利用中国知网(CNKI)、万方、维普和 Web of Science 等中英文数据库,以“土地利用方式”、“植被恢复”、“退耕还林还草”、“地形”、“黄土高原”、“小流域综合治理”和“土壤有机碳”等为关键词,并将“土壤有机碳”与其它关键词依次进行组合,与此同时以“land-use”、“land-use conversion”、“vegetation restoration”、“Grain-for-Green Program”、“landforms”、“comprehensive management of small watershed”、“Loess Plateau”以及“soil organic carbon”等为关键词,并将“soil organic carbon”与其它关键词依次组合进行文献的检索,收集并筛选了黄土高原地区 2020 年 10 月份以前发表的有关“土地利用方式转化-地形位置条件-土壤有机碳”的相关研究论文进行 Meta 分析。

为达到本研究的目的和减少文献筛选带来的偏差,所筛选的文献必须满足以下几个条件:1) 试验中必须以农田组为对照组,以非农田组(林地、草地和果园)为处理组;2) 研究论文所提供的土壤有机碳数据必须有试验的重复数(至少可以从论文其它部分得知)、标准差或者标准误。基于以上筛选标准,最终获得符合要求的研究论文 25 篇,获取有效数据 526 对。同时,数据的预处理结果显示,土地利用方式转化后土壤有机碳影响的效应值呈现出正态分布格局(图 1),因此论文的数据结果是可信的,即不存在文献的偏倚[22] [23]。

2.2. 数据处理

在获取数据的过程中,若已发表论文的数据以表格的形式呈现的话直接从表格中获取,若数据以图的形式呈现的话,则利用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件(从官方网站免费下载:<http://getdata-graph-digitizer.com>)来获取相关数据。在提取数据的过程中,首先在 Graph Digitizer 2.24 软件的

Graph 界面对图中的坐标进行定义(Assign Coordinates), 然后在 Graph Digitizer 2.24 软件的 Graph 界面对图中的数据进行数字化(Digitize), 最后将数字化好的数据导入到数据库中即可。为了达到本研究的目的, 本研究在获取土壤有机碳的同时还会获取经纬度、海拔、年均降雨量和平均气温、土地利用方式转化类型[农田转化为林地(NW)、农田转化为草地(NG)、农田转化为果园(NO)]、地形位置条件(塍面、坡地和沟道)。

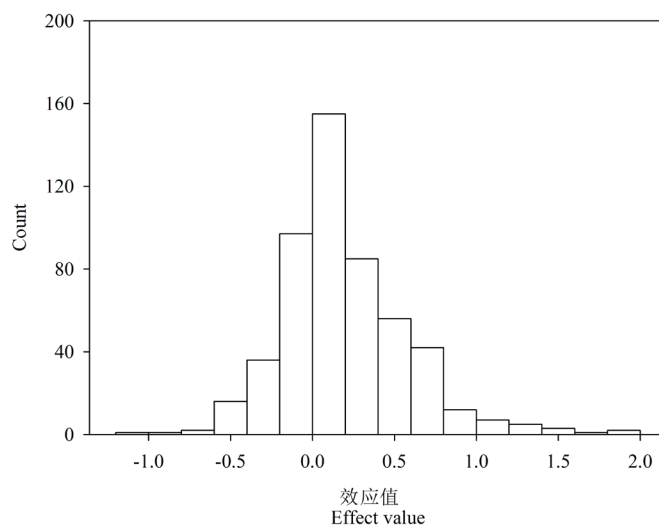


Figure 1. Normal distribution of effect size for the effect of land-use changes on soil organic carbon
图 1. 土地利用方式转化影响土壤有机碳效应值的正态分布图

如若研究论文提供的数据为标准误(SE), 则标准差(SD)可通过式(1)进行转换:

$$SD = SE\sqrt{E} \quad (1)$$

式中, N 为试验重复次数。

Meta 分析通过 MetaWin 2.1 软件(Sinauer Associates, Sunderland, USA)进行, 需要输入的有效数据为处理组和对照组土壤有机碳的均值(Mean)、标准差(SD)和样本重复次数(N)、以及分类变量。在进行 Meta 分析时, 同时需要引用效应值对试验数据进行量化。根据本试验所获取数据的特征, 同时为提高效应值的准确性, 本研究最终选取自然对数响应比($\ln RR$)来反映土地利用方式转化对土壤有机碳的影响程度[22] [23]。

$$\ln RR = \frac{\ln X_t}{\ln X_c} = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中, RR 为响应比, $\ln RR$ 为效应值, X_t 非农田处理下(果园措施、林地措施和草地措施)的土壤有机碳均值, X_c 为农田处理下的土壤有机碳均值。

利用 MetaWin 2.1 软件(Sinauer Associates, Sunderland, USA)首先得到每一对数据的效应值, 然后利用 MetaWin 2.1 软件的随机效应模型计算合并效应值/平均加权响应比(RR_{++})以及其 95% 的置信区间(CI), 具体相关计算公式见参考文献[24] [25]。 RR_{++} 为正值则为正效应, RR_{++} 为负值则为负效应。若置信区间包括 0, 则说明土地利用方式转化对土壤有机碳没有显著影响($P > 0.05$); 若置信区间全部大于 0, 则说明土地利用方式转化显著增加土壤有机碳($P < 0.05$); 若置信区间全部小于 0, 则说明土地利用方式转化显著减少土壤有机碳($P < 0.05$)。

同时, 为了便于理解和描述, 本研究通过下式计算土壤有机碳增加量的变化百分数[26] [27]。

$$\text{土壤有机碳增加量} = (e^{RR_{++}} - 1) \times 100\% \quad (3)$$

土地利用方式转化后,土地利用方式转化类型和地形位置条件对土壤有机碳的影响的相关图件利用 SigmaPlot 10.0 软件(Systat Software, Inc., San Jose, CA, USA)进行制作。

3. 结果分析

3.1. 土地利用方式转化类型对土壤有机碳的影响

土地利用方式转化类型是影响土壤有机碳的一个重要因素,在同一地形位置条件基本呈现出 $NW > NG > NO$ 的趋势(图 2)。在塿面地形条件下,NW、NG 和 NO 导致土壤有机碳在 0~20 cm 土层分别增加

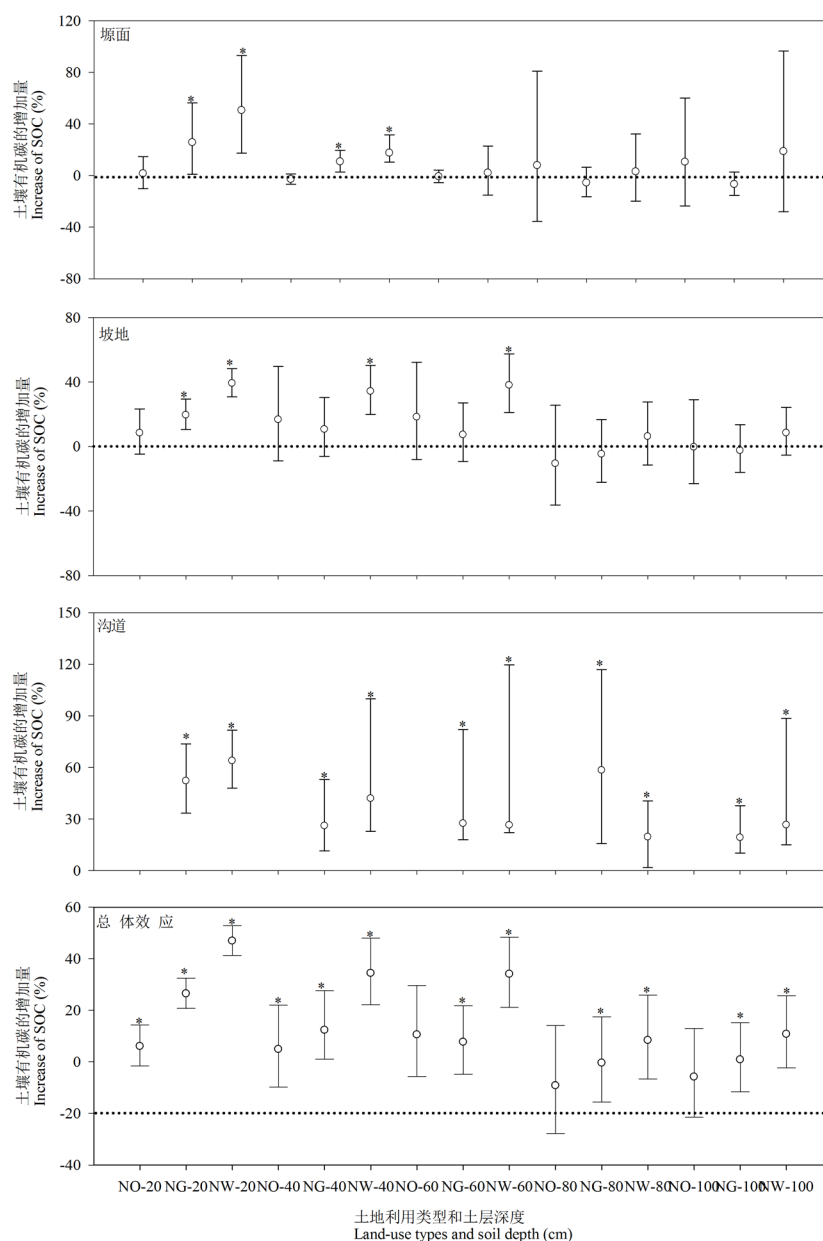


Figure 2. Effects of land-use change types on soil organic carbon. NW: Means cropland converting into woodland; NG: Means cropland converting into grassland; NO: Means cropland converting into orchard. The same as below

图 2. 土地利用方式转化类型对土壤有机碳的影响。NW: 农田转化为林地; NG 农田转化为草地, NO 农田转化为果园, 下同

了 50.6%、25.7%和 1.6%; NW 和 NG 在 20~40 cm 土层导致土壤有机碳分别增加了 17.6%和 10.8%, 而 NO 导致土壤有机碳减少了 2.8%; NW、NG 和 NO 在 40~100 cm 土层对土壤有机碳的影响不显著, 仍呈现出 NW > NG > NO 的趋势。

在坡地地形条件下, NW、NG 和 NO 导致土壤有机碳在 0~20 cm 土层依次增加了 39.3%、19.6%和 8.4%; 在 20~40 cm 土层, NW 条件下土壤有机碳增加了 34.3%, NG 条件下土壤有机碳增加了 10.7%, NO 条件下土壤有机碳增加了 16.7%; NW 在 40~60 cm 土层导致土壤有机碳增加了 38.1%, 然而 NG 和 NO 对土壤有机碳的影响不显著; NW、NG 和 NO 在 60~100 cm 土层对土壤有机碳的影响不显著。

在沟道地形条件下, 在 0~100 cm 土层内均呈现出 NW > NG 的趋势。NW 条件下的土壤有机碳在 0~20 cm 土层内的增加量高达 64.0%, 在 NG 条件下的增加量仅为 52.2%; NW 和 NG 条件下土壤有机碳的增加量在 20~40 cm 土层分别为 42.0%和 26.1%; 在 40~60 cm 土层, NW 和 NG 条件下土壤有机碳的增加量基本相等(26.5% vs. 27.5%); 在 60~80 cm 土层, 土壤有机碳的增加量呈现出 NG > NW 的趋势(58.5% vs. 19.6%); NW 和 NG 条件下土壤有机碳的增加量在 80~100 cm 土层分别增加了 26.6%和 19.3%。

在不考虑地形条件的制约后, 土壤有机碳的增加量基本呈现出 NW > NG > NO 的趋势, 且这种影响仅仅在 0~40 cm 土层影响显著, 在 40~100 cm 土层影响不显著(图 2)。NW、NG 和 NO 导致土壤有机碳的增加量在 0~20 cm 土层内依次为 46.9%、26.5%和 6.1%; 在 20~40 cm 土层, NW 条件下的土壤有机碳增加量为 34.4%, NG 条件下的土壤有机碳增加量为 12.3%, NO 条件下的土壤有机碳增加量为 4.9%; NW、NG 和 NO 在 40~100 cm 土层内对土壤有机碳的影响不显著。

3.2. 地貌类型对土壤有机碳的影响

除了土地利用方式转化类型以外, 地形位置条件也是影响土壤有机碳增加量的一个重要因素, 且土地利用方式转化后土壤有机碳的增加量基本呈现出沟道大于坡地大于塬面的趋势。在 NO 条件下, 在 0~100 cm 土层内土壤有机碳的增加量基本呈现出坡地大于塬面的趋势, 但影响不显著(图 3)。例如, 在 0~20 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在坡地条件下高达 8.4%, 但在塬面条件下仅为 1.6%; 在 20~40 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在坡地条件下为 16.7%, 但在塬面条件下却减少了 2.8%。

在 NG 条件下, 在 0~20 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道位置条件下高达 52.2%, 在塬面位置条件下为 25.7%, 而在坡地位置条件下仅为 19.6%; 在 20~40 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道、塬面和坡地位置条件下分别为 26.1%、10.8%和 10.7%; 在 40~100 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在塬面和坡地位置条件下影响不显著, 但在 40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道位置条件下依次为 27.5%、58.5%和 19.3% (图 3)。

在 NW 条件下, 在 0~20 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道位置条件下高达 64.0%, 在塬面位置条件下为 50.6%, 而在坡地位置条件下仅为 39.3%; 在 20~40 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道、塬面和坡地位置条件下分别为 42.0%、17.6%和 34.3%; 在 40~60 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道和坡地位置条件下分别为 26.5%、和 38.1%, 但在塬面位置条件下影响不显著; 在 60~80 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道为 19.6%, 但在塬面和坡地位置条件下影响不显著; 在 80~100 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道位置条件下为 28.6%, 但在坡地位置条件下影响不显著(图 3)。

在不考虑土地利用方式转化影响的条件下, 土壤有机碳的增加量基本呈现出沟道大于坡地大于塬面的趋势, 且土壤有机碳的增加量在塬面位置条件下仅在 0~20 cm 土层内影响显著, 在坡地位置条件下在 0~60 cm 土层内影响显著, 但在沟道位置条件下在 0~100 cm 土层内均影响显著(图 3, $P < 0.05$)。在 0~20 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道位置条件下高达 59.2%, 在塬面位置条件下仅为 17.1%, 而在坡地位置条件下为 29.1%; 在 20~40 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道和坡地位置条件下依次为 37.1%和

24.0%; 在 40~60 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道和坡地位置条件下差异较小(28.2% vs. 23.1%); 在 60~80 cm 和 80~100 cm 土层, 土壤有机碳的增加量在沟道位置条件下分别为 31.7%和 23.6% (图 3)。

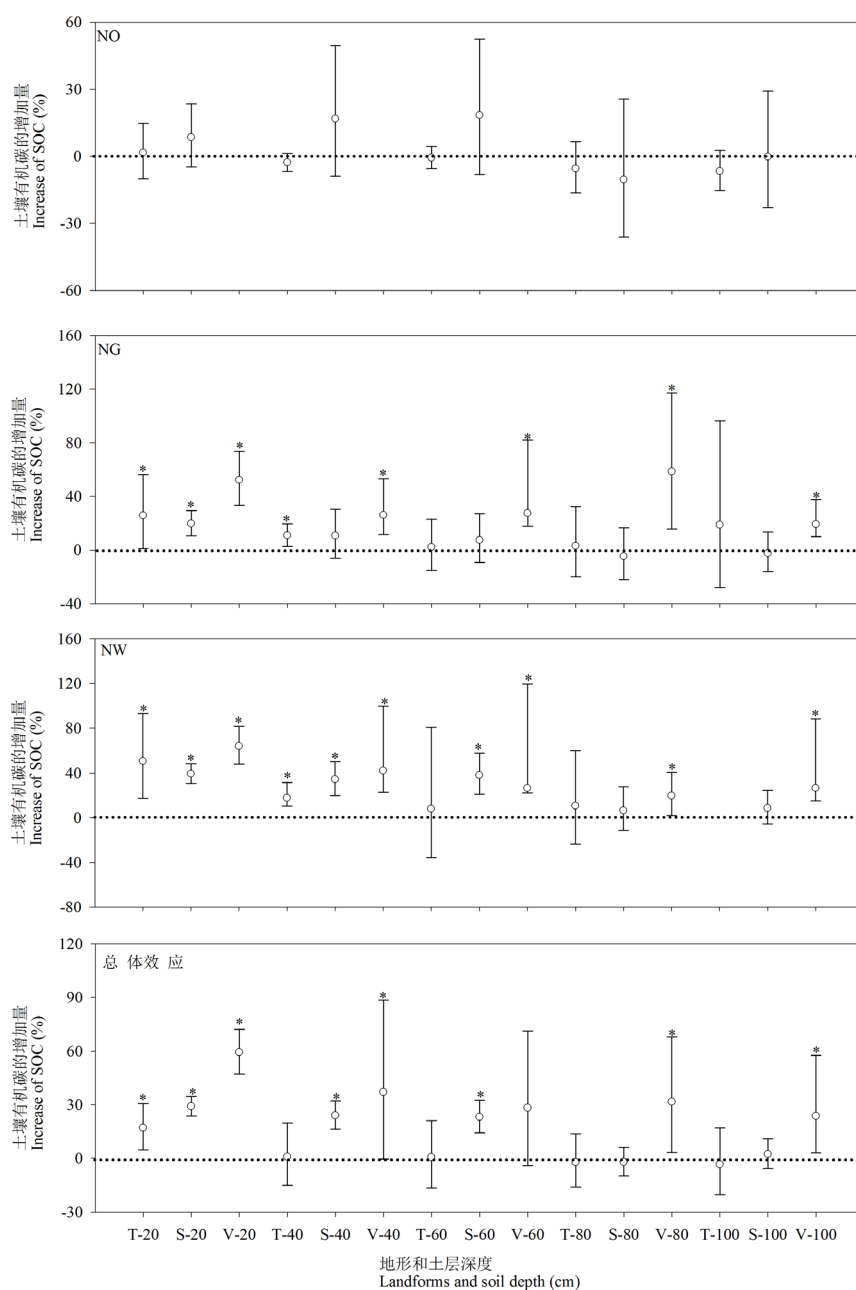


Figure 3. The effect of terrain location on soil organic carbon

图 3. 地形位置对土壤有机碳的影响

3.3. 土层深度对土壤有机碳的影响

除了地形位置条件和土地利用方式转化类型以外, 土层深度也是影响土壤有机碳的一个重要因素, 且土壤有机碳的增加量呈现出随着土层深度的增加而减少的趋势(图 4)。土地利用方式转化后, 在 0~20 cm 土层, 土壤有机碳增加了 33% (图 4, $P < 0.05$), 在 20~40 cm 土层, 土壤有机碳增加了 20.4% (图 4, $P <$

0.05), 在 40~60 cm 土层, 土壤有机碳增加了 19.7% (图 4, $P < 0.05$), 在 60~80 cm 和 80~100 cm 土层, 土壤有机碳仅仅增加了 0.5%和 2.9% (图 4, $P > 0.05$)。

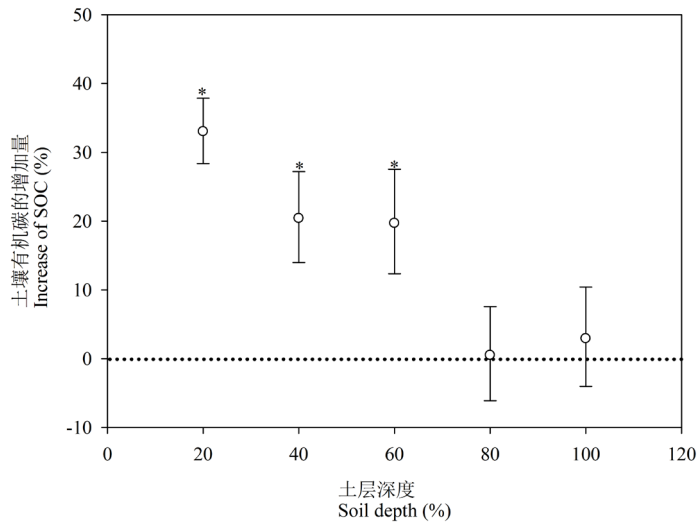


Figure 4. Effect of soil depth on soil organic carbon in response to land-use change
图 4. 土地利用方式转化后土层深度对土壤有机碳的影响

4. 讨论

4.1. 土地利用方式转化类型对土壤有机碳的影响

整合分析研究结果显示, 土地利用方式转化后土壤有机碳显著增加(4.9%~46.9%), 且增加的幅度呈现出 $NW > NG > NO$ 的趋势(图 2)。这是因为: 1) 土地利用方式转化后输入到土壤中的凋落物 (地上和地下)数量显著增加, 且研究结果显示 NG 条件下地下根系凋落物的输入量增加了 58.5%, 而 NW 条件下的地下根系凋落物输入量增加高达 118.4% (图 5), 这些输入到土壤中的凋落物有可能在土壤微生物的作用下经过腐殖化过程最终变成土壤有机碳而储存起来[28] [29]; 2) 土地利用方式转化后, NW 或者 NG

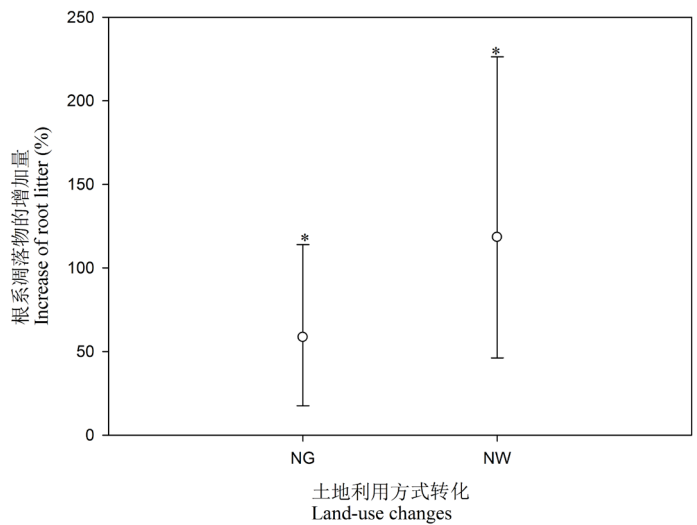


Figure 5. Effects of land-use change types on root litter
图 5. 土地利用方式转化类型对根系凋落物的影响

会拥有更加复杂的群落结构、较高的生物多样性、较少的人为干扰以及较强的抵御不利环境因素干扰的能力,而这些因素均会间接地导致土壤有机碳储量的增加[30] [31]; 3) 不同土地利用方式下的生物化学性质不同,一般而言林地和草地措施下的地下根系凋落物的木质素含量要高于相应农作物的地下根系凋落物的木质素含量,而凋落物的生物化学性质也是影响土壤有机碳积累的一个重要因素[27] [32]; 4) 与农田措施相比较而言, NW 和 NG 由于具有较大的植被覆盖度以及较少的人为干扰可以显著的减少水土流失,进而减少因径流和泥沙的迁移和搬运造成的土壤有机碳的流失[33] [34]。

4.2. 地形位置对土壤有机碳的影响

土地利用方式转化后,土壤有机碳因地形部位发生显著改变,且土壤有机碳的增幅呈现出沟道位置大于坡地位置和塍面位置的趋势(图 3),这可能与沟道位置承接大量的来自塍面和坡地的径流和泥沙,而土壤表层的土壤有机碳会伴随着径流和泥沙的迁移最终在沟道位置进行沉积和富集[14] [15] [34] [35],这可以被沟道位置的土壤水分含量和根系凋落物远远大于相应坡地位置的土壤水分含量和根系凋落物所佐证(图 6)。例如,无论是在草地措施还是农田措施下,整个剖面内(0~100 cm)土壤水分含量均呈现出沟道位置条件大于坡地位置条件的趋势(图 6)。较好的土壤水分条件有利于植被的生长[36],因此植被的地下根系凋落物在整个剖面(0~100 cm)也基本呈现出沟道位置条件大于坡地位置条件的趋势(图 6),而土壤水分和植被类型均是影响土壤有机碳的重要因素[36] [37]。

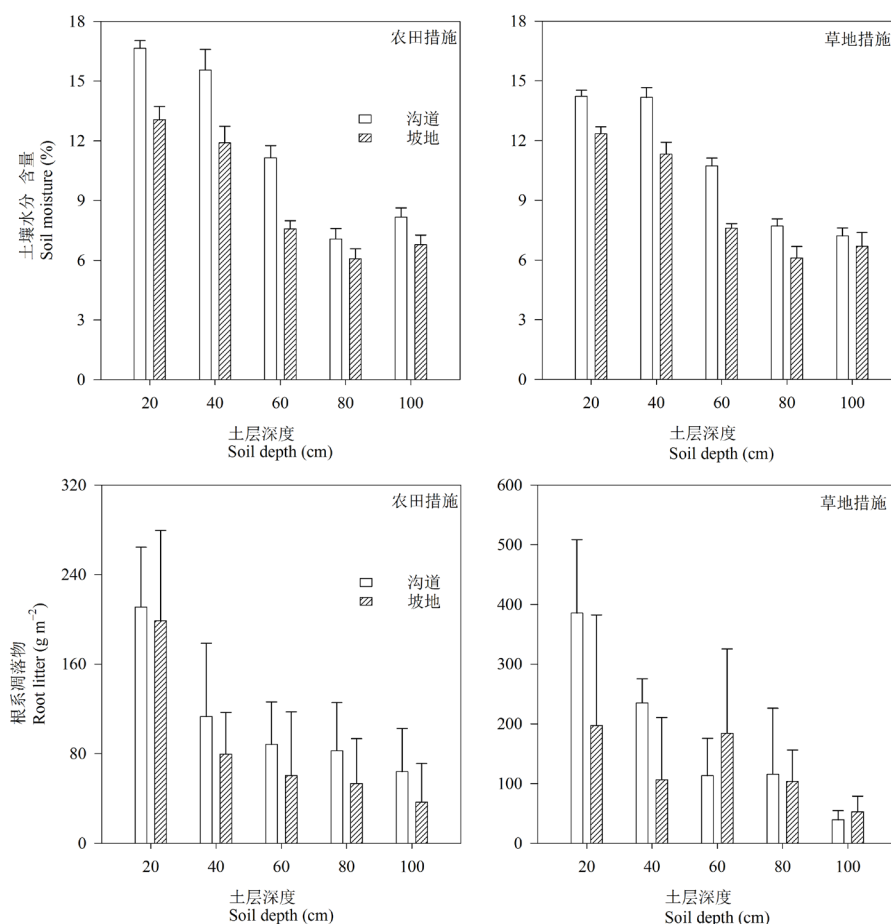


Figure 6. Effects of terrain location on soil moisture content and root litter

图 6. 地形位置条件对土壤水分含量和根系凋落物的影响

4.3. 土层深度对土壤有机碳的影响

除了土地利用方式转化类型和地形位置条件以外, 土层深度也是影响土壤有机碳增加量的一个重要因素, 且基本呈现出随着土层深度的增加而减少的趋势, 这可能与不同土层深度内的根系生物量和土壤水分含量、土壤微生物数量和土壤养分含量等因素的差异有关: 1) 根系生物量和土壤水分含量[9] [38], 大量的研究表明根系生物量和土壤水分含量随着土层深度的增加而呈现出减少的趋势[9] [38] [39] [40], 且整合分析研究结果表明根系生物量和土壤水分含量的增加量也均基本呈现出随着土层深度的增加而减少的趋势(图 7); 2) 土壤微生物数量[41], 例如在黄土高原的一个典型人工刺槐林内, 土壤微生物数量(放线菌、真菌和细菌)均随着土层深度的增加而呈现出减少的趋势, 且表层(0~20 cm)放线菌的数量分别是中层(20~50 cm)和底层(50~90 cm)放线菌数量的 3 倍和 24 倍, 表层真菌的数量分别是中层和底层真菌数量的 2 倍和 7 倍, 表层细菌的数量分别是中层和底层细菌数量的 18 倍和 185 倍[42]; 3) 土壤养分含量[43], 例如在黄土高原一个不同林龄的典型人工刺槐林内, 土壤全氮、土壤全磷和土壤全钾均呈现出随着土层深度的增加而减少的趋势[40]。除了上述因素以外, 不同土层深度内的土壤温度[44]、土壤理化性质[45]、土壤氧气含量[42]的差异也可有可能是导致不同土层深度上土壤有机碳增加量不同的原因之一, 具体原因有待进一步的试验进行佐证。

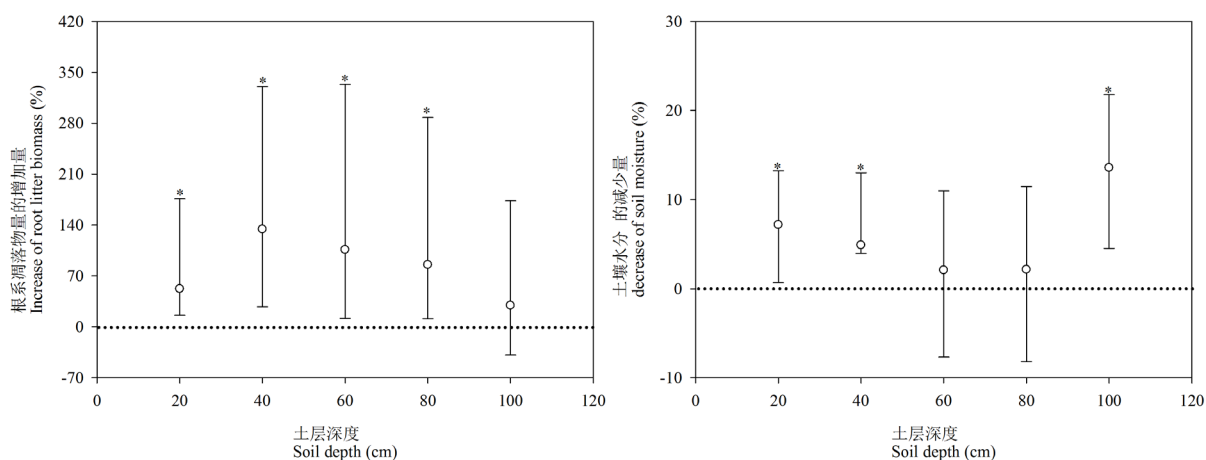


Figure 7. Effects of soil depth on soil moisture content and root litter
图 7. 土层深度对土壤水分含量和根系凋落物的影响

5. 结论

整合分析研究结果表明, 在黄土高原地区, 土地利用方式转化后土壤有机碳显著增加(4.9%~46.9%), 且增加量呈现出 $NW > NG > NO$ 的趋势。此外, 土地利用方式转化后土壤有机碳的增加量受到地形位置条件的限制, 土壤有机碳的增加量呈现出沟道位置大于坡地和塬面位置的趋势, 且不同土层深度的土壤有机碳增加量呈现出随着土层深度的增加而减少的趋势。

基金项目

国家自然科学基金项目(41801069; 4190010300); 陕西省科技计划项目(2018JQ3023; 2019JQ-895); 宝鸡文理学院博士科研启动费(ZK2017041); 北京市农林科学院杰出科研人才引进青年英才项目和北京市退化土地生态系统修复成效长期定位监测站建设(KJCX20200302); 陕西省社会科学基金项目(2019E007); 北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20170301)。

参考文献

- [1] Schlesinger, W.H. (1990) Evidence from Chronosequence Studies for a Low Carbon Storage Potential of Soils. *Nature*, **348**, 232-234. <https://doi.org/10.1038/348232a0>
- [2] Lal, R. (2004) Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science of the Total Environment*, **304**, 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- [3] Chen, L.-F., He, Z.-B., et al. (2016) Patterns and Environmental Controls of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in Alpine Ecosystems of Northwestern China. *Catena*, **137**, 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.017>
- [4] Yu, D.S., Shi, X.Z., Wang, H.J., Sun, W.X. and Zhao, Y.C. (2007) Regional Patterns of Soil Organic Carbon Stocks in China. *Journal of Environmental Management*, **85**, 680-689. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.020>
- [5] Song, X., Peng, C., Zhou, G., Jiang, H. and Wang, W. (2014) Chinese Grain for Green Program Led to Highly Increased Soil Organic Carbon Levels: A Meta-Analysis. *Scientific Reports*, **4**, Article No. 4460. <https://doi.org/10.1038/srep04460>
- [6] Deng, L., Liu, G.-B. and Shangguan, Z.-P. (2014) Land-Use Conversion and Changing Soil Carbon Stocks in China's "Grain-for-Green" Program: A Synthesis. *Global Change Biology*, **20**, 3544-3556. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>
- [7] Wiesmeier, M., et al. (2015) Land Use Effects on Organic Carbon Storage in Soils of Bavaria: The Importance of Soil Types. *Soil & Tillage Research*, **146**, 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.003>
- [8] 崔永琴, 马剑英, 刘小宁, 段争虎. 人类活动对土壤有机碳库的影响研究进展[J]. 中国沙漠, 2011(2): 407-414.
- [9] 张彦军, 郭胜利. 复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 961-969.
- [10] Zhu, M., Feng, Q., Zhang, M., Liu, W., Qin, Y., De, R.C. and Zhang, C. (2019) Effects of Topography on Soil Organic Carbon Stocks in Grasslands of a Semiarid Alpine Region, Northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, **19**, 1640-1650. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2203-0>
- [11] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [12] 刘国彬, 王兵, 卫伟, 蔡进军, 陈云明, 毕华兴, 刘广全, 魏安智. 黄土高原水土流失综合治理技术及示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7074-7077.
- [13] Zhu, M., Feng, Q., Qin, Y., Cao, J., Li, H. and Zhao, Y. (2017) Soil Organic Carbon as Functions of Slope Aspects and Soil Depths in a Semiarid Alpine Region of Northwest China. *Catena*, **152**, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.011>
- [14] Sabzevari, T. and Talebi, A. (2019) Effect of Hillslope Topography on Soil Erosion and Sediment Yield Using USLE Model. *Acta Geophysica*, **67**, 1587-1597. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00361-8>
- [15] Dialynas, Y.G., Bastola, S., Bras, R.L., Billings, S.A., Markewitz, D. and Richter, D.D. (2016) Topographic Variability and the Influence of Soil Erosion on the Carbon Cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, **30**, 644-660. <https://doi.org/10.1002/2015GB005302>
- [16] Griffiths, R.P., Madritch, M.D. and Swanson, A.K. (2009) The Effects of Topography on Forest Soil Characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the Effects of Climate Change on Soil Properties. *Forest Ecology & Management*, **257**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.010>
- [17] Liu, M.X., Wang, Q.Y., Guo, L., Yi, J. and Lin, H. (2020) Influence of Canopy and Topographic Position on Soil Moisture Response to Rainfall in a Hilly Catchment of Three Gorges Reservoir Area, China. *Journal of Geographical Sciences*, **30**, 86-105. <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1764-1>
- [18] Kobayashi, Y. and Koike, F. (2010) Separating the Effects of Land-Use History and Topography on the Distribution of Woody Plant Populations in a Traditional Rural Landscape in Japan. *Landscape & Urban Planning*, **95**, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.11.003>
- [19] Alphonse, K., Felix, N., Lamek, N., Fidele, K., Jean, N., Christophe, M. and Enan, N. (2017) Analysis of Climate and Topography Impacts on the Spatial Distribution of Vegetation in the Virunga Volcanoes Massif of East-Central Africa. *Geosciences*, **7**, 17. <https://doi.org/10.3390/geosciences7010017>
- [20] 张祎, 李鹏, 肖列, 赵宾华, 时鹏. 黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1140-1150.
- [21] 王伟, 李占斌, 李鹏, 王飞超, 张神. 生态建设对坡面土壤有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 35-41.
- [22] Luo, Y., Hui, D. and Zhang, D. (2006) Elevated CO₂ Stimulates Net Accumulations of Carbon and Nitrogen in Land Ecosystems: A Meta-Analysis. *Ecology*, **87**, 53-63. <https://doi.org/10.1890/04-1724>
- [23] Hedges, L.V., Gurevitch, J. and Curtis, P.S. (1999) The Meta-Analysis of Response Ratios in Experimental Ecology.

- Ecology*, **80**, 1150-1156. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[1150:TMAORR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1150:TMAORR]2.0.CO;2)
- [24] Zhou, L., Zhou, X., Shao, J., Nie, Y., He, Y., Jiang, L., Wu, Z. and Hosseini Bai, S. (2016) Interactive Effects of Global Change Factors on Soil Respiration and Its Components: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **22**, 3157-3169. <https://doi.org/10.1111/gcb.13253>
- [25] Zhou, L., Zhou, X., Zhang, B., Lu, M., Luo, Y., Liu, L. and Li, B. (2014) Different Responses of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen Addition among Biomes: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **20**, 2332-2343. <https://doi.org/10.1111/gcb.12490>
- [26] Puget, P. and Drinkwater, L.E. (2001) Short-Term Dynamics of Root- and Shoot-Derived Carbon from a Leguminous Green Manure. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 771-779. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653771x>
- [27] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 李泽. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1214-1223.
- [28] 魏强. 亚热带典型森林凋落物输入对土壤有机碳累积和稳定性影响[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [29] 李常准, 陈立新, 段文标, 李少然, 李亦菲, 于颖颖, 朱佳慧, 赵戈榕. 凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 100-109.
- [30] Zheng, F. and Wang, B. (2013) Soil Erosion in the Loess Plateau Region of China. Restoration and Development of the Degraded Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, **5**, 77-92. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54481-4_6
- [31] Zhang, J.-T. and Dong, Y. (2010) Factors Affecting Species Diversity of Plant Communities and the Restoration Process in the Loess Area of China. *Ecological Engineering*, **36**, 345-350. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.04.001>
- [32] Dignac, M.-F., et al. (2005) Carbon-13 Natural Abundance as a Tool to Study the Dynamics of Lignin Monomers in Soil: An Appraisal at the Closeaux Experimental Field (France). *Geoderma*, **128**, 3-17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.022>
- [33] 高健翎, 高燕, 马红斌, 党恬敏. 黄土高原近 70a 水土流失治理特征研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 65-69, 84.
- [34] 夏彬, 朱世硕, 郝旺林, 许明祥. 黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层土壤含水量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 177-183.
- [35] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 李俊超. 水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 161-169.
- [36] 冯棋, 杨磊, 王晶, 石学圆, 汪亚峰. 黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6598-6609.
- [37] 李典友, 章玉成. 土壤有机碳及其影响因素[J]. 农业科学, 2020, 10(10): 8.
- [38] 马婧怡, 贾宁风, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3471-3481.
- [39] 王彦丽. 不同植被恢复措施下剖面根系与 SOC 的分布特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 19-23.
- [40] 梁香寒, 张克斌, 乔厦. 半干旱黄土区柠条林土壤水分和养分与群落多样性关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1748-1756.
- [41] Hsiao, C.J., Sassenrath, G.F., Zeglin, L.H., Hettiarachchi, G.M. and Rice, C.W. (2018) Vertical Changes of Soil Microbial Properties in Claypan Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **121**, 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.012>
- [42] 张社奇, 王国栋, 田鹏, 郭满才. 黄土高原刺槐林地土壤微生物的分布特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 128-131.
- [43] 李晓红. 鄱阳湖湿地不同植物群落土壤养分和土壤酶活性垂直分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 69-75.
- [44] 黄群山, 叶源忠. 浅析武夷山山地土壤理化性质的垂直分异[J]. 太原师范学院学报: 自然科学版, 2008, 7(3): 128-131.
- [45] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 598-604.