

DOI: 10.5846/stxb201808031659

张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 龚兰兰. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局. 生态学报, 2020, 40(2): 629-639.

Zhang Y J, Yu Y C, Niu J J, Gong L L. The elevational patterns of soil organic carbon storage on the northern slope of Taibai Mountain of Qinling. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 629-639.

秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局

张彦军^{1, 2}, 郁耀闯^{1, 2, *}, 牛俊杰^{2, 3}, 龚兰兰^{1, 2}

1 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721013

2 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013

3 太原师范学院汾河流域科学发展研究中心, 晋中 030619

摘要: 土壤碳库是陆地生态系统的重要碳库, 山区大约占全球 25% 的陆地表面积, 因此研究山区土壤有机碳储量的变化特征及其影响因素对丰富陆地生态系统土壤碳循环理论具有重要的意义。在秦岭太白山北坡上, 海拔高度每隔 50 m 设置一个采样点, 研究土壤有机碳储量的海拔梯度变化特征及其影响因素。海拔梯度对太白山北坡的 SOCD 影响显著, 且不同土层厚度的 SOCD 均呈现出随着海拔梯度的增加而增加的趋势, 增加幅度高达 10%—88%。不同气候带上的 SOCD 差异显著, 呈现出亚寒带 (3.63 kg/m²) 大于寒温带 (3.40 kg/m²) 大于温带 (3.39 kg/m²) 大于暖温带 (3.30 kg/m²) 的趋势。SOCD 也因植被带发生显著差异, 最小值出现在低山扰动带仅为 2.15 kg/m², 而最大值出现在高山草甸带高达 3.63 kg/m², 平均 2.94 kg/m²。SOCD 随着土层厚度的增加呈现出减少的趋势, 减少幅度为 14%—70%。在太白山北坡上, 随着海拔梯度的增加, 土层深度从低山区的 78 cm 减少到中山区的 33 cm 和高山区的 10 cm, 相应的总 SOCD 从低山区的 35.45 kg/m² 减少到中山区的 28.84 kg/m² 和高山区的 12.29 kg/m², 但是对应单位土层深度上的 SOCD 却从低山区的 0.51 kg/m² 增加到中山区的 0.87 kg/m² 和高山区的 1.23 kg/m²。因此, 在秦岭太白山北坡上, 除了海拔梯度、气候带、植被带、土层厚度等因素以外, 土层深度对土壤有机碳储量的影响不容忽视, 这对准确预测该区域的土壤碳储量具有重要的理论和实际意义。

关键词: 太白山; 土壤有机碳密度; 土层深度; 土层厚度; 海拔梯度

The elevational patterns of soil organic carbon storage on the northern slope of Taibai Mountain of Qinling

ZHANG Yanjun^{1, 2}, YU Yaochuang^{1, 2, *}, NIU Junjie^{2, 3}, GONG Lanlan^{1, 2}

1 Geography and Environmental Engineering Department, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

3 Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China

Abstract: Soil carbon pool is an important carbon pool of terrestrial ecosystems. The mountainous areas account for about 25% of the world's surface area. Study on variations of the soil organic carbon storage in mountainous areas and their influencing factors is of great significance for enriching the soil carbon cycle theory of terrestrial ecosystems. On the northern slope of the Taibai Mountain in the Qinling, the sampling sites were set at every 50 meters above sea level to explore characteristics of the soil organic carbon storage along an altitude gradient. The results showed that altitude gradient had a significant impact on the soil organic carbon density (SOCD). The SOCD of different soil thicknesses increased by 10%—88% with the increasing altitude gradient. The climate zone also presented a significant impact on the SOCD. The order was

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801069); 陕西省科技厅项目 (2018JQ3023); 宝鸡文理学院博士科研启用费项目 (ZK2017041); 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室项目 (2010JS074)

收稿日期: 2018-08-03; **网络出版日期:** 2019-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyanjun@bjwlxy.cn; yuyaochuang@126.com

subfrigid zone (3.63 kg/m^2) > cold temperate zone (3.40 kg/m^2) > temperate zone (3.39 kg/m^2) > warm temperate zone (3.30 kg/m^2). The SOCD showed significantly variation along different vegetation zones, with an average value of 2.94 kg/m^2 . The minimum value of 2.15 kg/m^2 occurred in the low mountain disturbance zone, while the maximum value of 3.6 kg/m^2 appeared in the alpine meadow zone. The SOCD showed a decreasing trend with the increase of soil thickness, with a reduction range of 14%—70%. On the northern slope of Taibai Mountain, the soil depth was 78 cm in the low mountainous area, whereas it was 33 cm and 10 cm in the middle and high mountainous area, respectively. Total SOCD was 35.45 kg/m^2 , 28.84 kg/m^2 , and 12.29 kg/m^2 in the low, middle, and high mountainous area, respectively. As opposed, the SOCD at the depth of the unit soil in the low, middle, and high mountainous area was 0.51 kg/m^2 , 0.87 kg/m^2 , and 1.23 kg/m^2 , respectively. The results indicated that, in addition to the elevation gradient, climatic zone, vegetation zone, and soil thickness, the influence of soil depth on soil organic carbon storage cannot be ignored for accurate prediction of soil carbon storage in this area.

Key Words: Taibai Mountain; soil organic carbon density; soil depth; soil thicknesses; altitude gradient

山区大约占全球 25% 的陆地表面积,其至少拥有全球 1/3 的陆地生态系统植被物种多样性,并为全球一半的人类提供生活所需的水分^[1-2],其较大的海拔梯度为研究环境变化影响生物地球化学循环过程提供了优越的自然条件^[3]。森林生态系统是陆地生态系统的主体,是陆地上最大的碳储存库和碳吸收汇^[4],森林生物量碳贮量达 283 Gt C,约占全球植被碳储量的 77%,森林土壤的碳贮量约占全球土壤碳储量的 39%^[5]。因此,研究山区森林土壤有机碳储量的变化特征及其影响因素对应未来气候变化具有重要的理论和实际意义。

已有的研究表明,在山地生态系统中随着海拔梯度的增加土壤有机碳储量呈现出或者增加^[6-7]或者减少^[8-9]的趋势,土壤有机碳储量的这种海拔梯度格局可能与植被类型^[10]、气候带^[11]、土壤理化性质^[12]、土壤微环境^[12]、土层厚度^[10]、土壤微生物群落结构和活性^[13]等因素密切相关。除了上述几种因素以外,土层深度也是影响土壤有机碳储量的一个重要因素^[14]。例如,在全球尺度上,0—100 cm 土层内的 SOC 储量大约为 $1502 \times 10^{15} \text{ Pg C}$,而 0—200 cm 土层内却含有 $1993 \times 10^{15} \text{ Pg C}$,但是在 0—300 cm 土层内的 SOC 储量却高达 $2344 \times 10^{15} \text{ Pg C}$ ^[15],因此土层深度对土壤有机碳储量的影响不容忽视,这在土层深度受限的山地生态系统中显得尤为重要^[6]。在山地生态系统中,土层深度随着海拔梯度的增加呈现出或者减少^[16-17]或者增加^[6, 18]的趋势,但是在该区域中目前很少有研究在较大海拔梯度下探讨土层深度对土壤有机碳储量的影响^[6],这对全面理解山地生态系统的土壤有机碳储量的海拔梯度格局具有限制作用。因此,在山地生态系统中,在已有的研究基础上进一步深入研究土壤有机碳储量的海拔梯度变化特征及其驱动因素对准确估算该区域的土壤碳储量具有重要的理论和实际意义。

秦岭导致我国南北地区在气候、河流、植被、土壤、农业等方面存在显著的差异,是我国南北最重要的地理、地质分界线^[19]。太白山作为秦岭的主峰,是我国大陆东部的最高峰(海拔高度 3767 m),由于山体高大,由山麓到山顶有着明显的气候垂直带谱和复杂完整的植被垂直带谱^[20-21]。在秦岭太白山上,针对海拔梯度的研究主要集中在植被的垂直分布和群落结构调查^[21-22]、叶片光合特性和分解特征研究^[23-24]、土壤肥力状况和成土因素调查^[19, 25]、土壤有机碳储量和土壤呼吸速率特征等方面的研究^[26-27],然而对于土壤有机碳储量的海拔梯度变化特征及其影响因素的研究相对较少。基于此,本研究在秦岭太白山的北坡上,从山麓到山顶海拔高度每隔 50 m 设置一个采样点,研究土壤有机碳储量的海拔梯度变化特征及其影响因素,以期为准准确估算该区域的土壤有机碳储量提供重要的数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

太白山位于陕西省西南部眉县、太白县和周至县三县的交界,最高峰拔仙台海拔高度 3767.2 m,垂直落差

3000 多米,地跨北纬 33°49′01″—34°08′11″,东经 107°41′23″—107°51′40″。太白山位于秦岭山脉中段,是秦岭的主峰,也是我国大陆地区中东部第一高峰,其东西长约 61 km,南北宽约 39 km,山体近东西向展布。太白山自然地理位置特殊,居暖温带之南缘,亚热带之北界,冬季受蒙古冷气团的控制,夏季受太平洋副高压带的影响。该地区年平均气温 1.8—2.1℃,降雨量 800—900 mm,属大陆性季风气候区。太白山地处中国西北部温带至暖温带的过渡区,四季分明,是典型的内陆季风气候区。太白山海拔梯度大,海拔高度每上升 100 m,气温下降约 0.21—0.58℃,具有显著的气候垂直地带性差异,由高至低依次为亚寒带、寒温带、温带、暖温带,具体详见表 1。

表 1 不同气候带特征

Table 1 Characteristics of different climatic zones

海拔高度/m Altitude gradient	气候带 Climatic zone	年均降水/mm Average annual precipitation	年均气温/℃ Average annual temperature	特征 Characteristic
800—1300	暖温带	650—800	8.7—12.7	温和湿润,干湿季分明,蒸发量小于等于降雨量
1300—2600	温带	900—1000	1.7—8.7	温凉湿润,冬长夏短,晚霜频繁,植物生长期易遭雪压、雪折和霜冻,蒸发量小于降雨量
2600—3350	寒温带	800—900	-2.1—1.8	寒冷潮湿,风大雾多,日夜温差大,蒸发量小于降雨量
3350—3767	亚寒带	750—800	-4.4—2.1	寒冷半湿润,风大雾雪多,冬长而无夏,蒸发量小于等于降雨量

太白山是由东太白(拔仙台)、西太白山(鳌山)及其间主脊(跑马梁)和两侧南北延伸的多条支脉构成的组合体,属于褶皱断块高山。受地质构造的控制,太白山北坡极为陡峻,多深切峡谷或嶂谷,由下到上可分为低山区、中山区、高山区三种地貌类型。其中,营头稍南至刘家崖属于黄土覆盖的石质低山区,海拔高度在 800—1500 m 之间,起伏的地形,具有黄土地貌和石质山地地貌的综合特征,相对高差不大,黄土覆盖;刘家崖至放羊寺属于石质中山区,海拔高度在 1500—3000 m 之间,以峰岭地貌发育为特征;放羊寺至太白山顶峰是以第四纪冰川地貌为特征的高山区,海拔高度在 3000 m 以上。

太白山植被类型丰富,植被垂直带谱完整,垂直地带性明显,根据植物群落的外貌、种类组成、群落结构及环境特征,由下向上依次可以分为以下 6 个植被带^[19]:

1) 低山扰动带

太白山山麓海拔高度约为 600—1000 m 为低山带,人为扰动较大,农田主要以小麦 (*Triticum aestivum*) 和玉米 (*Zea mays*) 为主,果园以猕猴桃 (*Actinidia chinensis*) 为主,有散生的栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 林和侧柏 (*Platycladus orientalis*) 林,陡坡有栎林、混交林和侧柏林等,其中栓皮栎林是山地系统较稳定的植物群落,其群落的均匀度、多样性指数和物种丰富度都比较低。在丘陵农田区常见的散生树木有杨树 (*Populus spp.*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、柳树 (*Salix spp.*)、椿树 (*Ailanthus altissima* Swingleh) 等。

2) 锐齿栎林带

本带海拔高度约为 1000—2000 m,栎林带在太白山北坡自上而下主要为辽东栎 (*Quercus wutaishanica*) 林、锐齿槲栎 (*Quercus aliena var. acuteserrata*) 林和栓皮栎 (*Quercus variabilis var. variabilis*) 林。辽东栎是一种落叶乔木,喜光,多分布在土层较厚和稍湿润的向阳山坡上,纯林较多,锐齿槲栎和栓皮栎纯林较少。

3) 混交林带

本带海拔高度约为 2000—2500 m,是太白山北坡树种最复杂、植被类型最多的地区,主要植物群落有华山松 (*Pinus armandii*) 林、栎林和落叶阔叶混交林。

华山松林主要分布在海拔高度 1400 m 以上的山地,有纯林,也有与辽东栎林组成的混交林。华山松为常绿乔木,喜光、喜温和凉爽湿润的气候,能适应多种土壤,但对土壤水分要求严格,多分布于阴坡、山脊和山

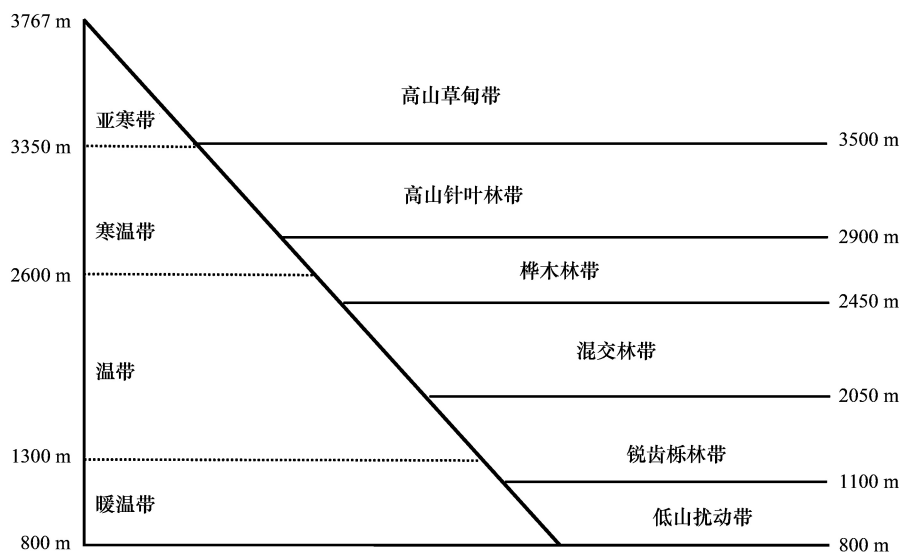


图1 太白山北坡气候和植被垂直带谱

Fig.1 Vertical spectrum of climate and vegetation along an altitude gradient on the northern slope of Taibai Mountain of Qinling

顶上。

落叶阔叶混交林分布于本带山谷地区,组成种类复杂,层次较多,且层次之间区分不明显。混交林下有不同高度的乔木和灌木;同时在林缘,尤其是沟边,藤本植物非常丰富。

4) 桦木林带

太白山北坡海拔高度约在 2300—2600 m 之间,生长着红桦 (*Betula albo-sinensis*) 林及其变种牛皮桦 (*Betula albo-sinensis* var. *septrionalis*) 林。这两种桦树各自组成纯林,上段与巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 交错分布,下段与华山松交错分布。

红桦林多分布在气候温凉湿润、土壤偏酸性、地形起伏剧烈、植物生长立地条件较差的地区。在土壤非常瘠薄的地方,红桦常常被适应性更强的牛皮桦取代,后者是原生裸地上的先锋树种,能形成原生林。影响牛皮桦林分布的主导因子是坡向和海拔高度。

5) 高山针叶林带

高山针叶林带主要分布于海拔高度 2500—3300 m 之间,上段为太白红杉 (*Larix chinensis*) 林,下段主要是巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 林。林下灌木有松花竹、蒲乐杜鹃、金背枇杷。与巴山冷杉相伴生的乔木有桦树 (*Betula* spp.) 及槭树 (*Acer saccharum*) 等。太白红杉主要分布在 3000—3300 m 的崩塌陡坡,林下植物较少,以苔草、藓类和地衣为主。

6) 高山灌丛草甸

太白山北坡海拔高度在 3300 m 以上即无乔木分布,此界限以上为 20—30 cm 高的矮型或匍匐性高山灌木。头花杜鹃 (*Rhododendron cephalanthum*) 灌丛是太白山高山灌丛的主要类型,与其相间分布的是高山柳 (*Salix cupularis*) 灌丛和高山绣线菊 (*Spiraea alpina*) 灌丛。灌丛群落中常有禾叶蒿草密生,其覆盖度可达 20%。近山顶多为危崖峭壁,岩石分化崩塌甚烈,在岩石表面缀生许多壳状地衣,在稍有碎土之地,则有枝状地衣 (*Cladonia* spp.)。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 土壤样品的采集

于 2016 年 5 月至 2016 年 9 月,在太白山北坡上沿着海拔梯度的变化,海拔高度每升高 50 m 设置一个 20 m × 20 m 的样地作为采样点,为了保证样地的代表性,减少局地地形条件对土层深度和土壤有机碳积累等因

素的影响^[6,15],选取的样地尽可能保证坡位、坡向、坡度等地形条件基本接近一致。在每块样地内按 S 型或对角线法随机选取 3—5 个能代表整个样地的样点进行土壤样品的采集。用土钻(内径 3 cm)按 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm(具体采样深度以实际采样为主,不够 100 cm 的采集到母岩为止)6 个层次分层采集各层土壤样品,装袋、标记编号。在采样的过程中利用 GPS 定位采样点的海拔高度、地理位置等信息。同时在每个样地内,挖一个深度约为 100 cm 的土壤剖面(具体采样深度以实际采样为主,不够 100 cm 的采集到母岩为止),除去土壤表层的植物体,利用体积约为 100 cm³的环刀,按照 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 分层采集土壤,立即带回实验室进行称重,并计算土壤容重(环刀法)。由于是土石山区,土壤中肯定含有不少的石粒,本研究中土壤容重的计算包括石粒,如果在采样过程中遇到母岩,则该层次的土壤样品和土壤容重均不采集。

1.2.2 样品分析

新鲜样品混合均匀后,在室内进行自然风干,风干样品过 0.15 mm 筛后,测定 SOC($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法)含量(g/kg),土壤容重的测定利用环刀法。

1.2.3 土壤有机碳密度的估算

土壤有机碳密度(SOCD)利用下列方程进行计算:

$$\text{SOCD} = \sum_i^m \text{SOC}_i \text{BD}_i D_i \quad (1)$$

式中,SOCD 是土壤有机碳密度(kg/m²),SOC_{*i*}是第 *i* 层的土壤有机碳含量(g/kg),BD_{*i*}是第 *i* 层的土壤容重(g cm⁻³),D_{*i*}是第 *i* 层的土层厚度(m),*m* 是土层的数量。

1.3 统计分析

利用 Excel 软件进行数据的预处理,利用 Sigmaplot 软件进行有关基础图件的制作,并用 SAS 软件的 UNIVARIATE plot normal 程序包对 SOCD 数据进行正态分布检验。利用 SAS 软件对不同海拔梯度、气候带和植被带下的 SOCD 进行了方差分析(GLM),当 *F* 检验显著时再进行 3 种海拔梯度(低山区、中山区和高山区)、4 种气候带(亚寒带、寒温带、温带、暖温带)以及 6 种植被带(低山扰动带、锐齿栎林带、混交林带、桦木林带、高山针叶林带和高山草甸带)均值间的 Duncan 检验。此外,利用 SAS 软件的 PROC reg 程序包对分析获得的 SOCD(*y*)和土壤理化性质(*x*)进行回归分析(线性和非线性)。

2 结果分析

2.1 SOCD 变异的影响因子分析

太白山北坡的 SOCD 的变化范围为 0.24—14.99 kg/m²,均值为 2.23 kg/m²,变异系数高达 76%,数据接近正态分布($W=0.8404, N=652, P<0.0001$)。进一步的数据分析表明,气候带、山区类型、海拔梯度、土层厚度、气候带和土层厚度的交互作用、气候带与山区类型和土层厚度的交互作用以及气候带与海拔梯度和土层厚度的交互作用均对太白山北坡的 SOCD 影响显著($P<0.0001$,表 2)。

2.2 海拔梯度和土层厚度对 SOCD 的影响

海拔梯度对太白山北坡的 SOCD 影响显著,且不同土层厚度的 SOCD 均呈现出随着海拔梯度的增加而增加的趋势(图 2)。在 0—10 cm 土层,SOCD 从低山区的 3.23 kg/m²增加到中山区的 3.71 kg/m²和高山区的 3.55 kg/m²,分别增加了 15%和 10%;在 10—20 cm 土层,SOCD 从低山区的 2.03 kg/m²增加到中山区的 2.35 kg/m²,增幅达到 16%;在 20—40 cm 土层,SOCD 在低山区和中山区分别为 3.08 kg/m²和 5.78 kg/m²,增加了 88%(图 3)。

除了海拔梯度以外,土层厚度也是影响 SOCD 的一个不可忽视的因素。在太白山北坡上,SOCD 基本呈现出随着土层厚度的增加而减少的趋势(图 2)。SOCD 在 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 土层依次为 3.41 kg/m²、2.11 kg/m²、3.64 kg/m²、1.83 kg/m²、1.26 kg/m²和 1.08 kg/m²,

减少幅度分别为 68%、49%、70%、41%和 14%。

表 2 太白山北坡 SOCD 变异的影响因子方差分析

Table 2 Variance analysis of influence factors of SOCD variation on the northern slope of Taibai Mountain					
项目 Items	df	SS	MS	F	Pr > F
Q	3	194.6190930	64.8730310	359.51	<0.0001
S	2	41.1473662	20.5736831	114.01	<0.0001
H	52	822.6665129	15.8205099	87.67	<0.0001
T	5	306.9158690	61.3831738	340.17	<0.0001
Q×T	7	99.8685968	14.2669424	79.06	<0.0001
Q×S×T	2	7.6242817	3.8121408	21.13	<0.0001
Q×H×T	132	340.9890784	2.5832506	14.32	<0.0001

Q 代表气候带,S 代表山区分类,H 代表海拔梯度,T 土层厚度,df 代表自由度,SS 代表平方和, MS 代表均方

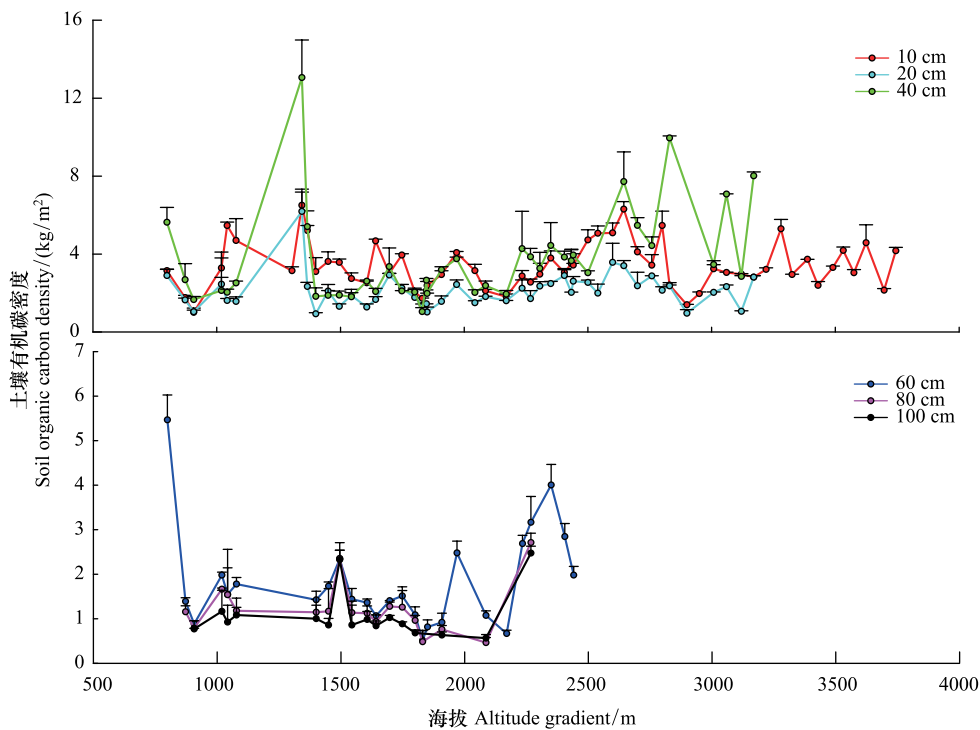


图 2 海拔梯度对 SOCD 的影响

Fig.2 Effect of altitude gradient on SOCD on the northern slope of Taibai Mountain

2.3 气候带对 SOCD 的影响

在太白山北坡上,气候带对 SOCD 的影响显著,且基本呈现出亚寒带大于寒温带大于温带大于暖温带的趋势(图 4)。在 0—10 cm 土层,SOCD 在不同气候带间的差异不显著 ($P>0.05$),但也呈现出亚寒带 (3.63 kg/m^2)>寒温带 (3.42 kg/m^2)>温带 (3.39 kg/m^2)>暖温带 (3.30 kg/m^2)的趋势;在 10—20 cm 土层,寒温带 (2.24 kg/m^2)和温带 (2.13 kg/m^2)的 SOCD 分别是暖温带 (1.86 kg/m^2)SOCD 的 1.20 和 1.15 倍;在 20—40 cm 土层,寒温带 (6.12 kg/m^2)和温带 (3.19 kg/m^2)的 SOCD 依次较暖温带 (2.65 kg/m^2)的 SOCD 提高了 131%和 20%;在 40—60 cm 土层,SOCD 在暖温带和温带依次为 2.12 kg/m^2 和 1.73 kg/m^2 ;在 60—100 cm 土层,SOCD 在暖温带和温带之间的差异不显著。

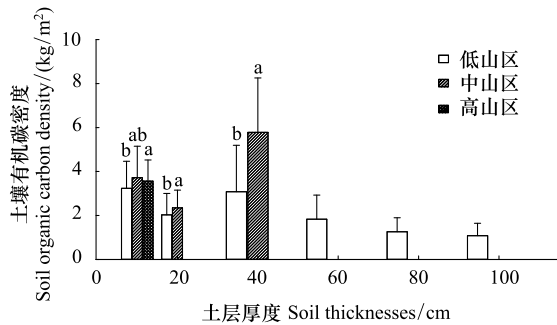


图3 山区对 SOCD 的影响

Fig.3 Effect of mountain type on SOCD on the northern slope of Taibai Mountain

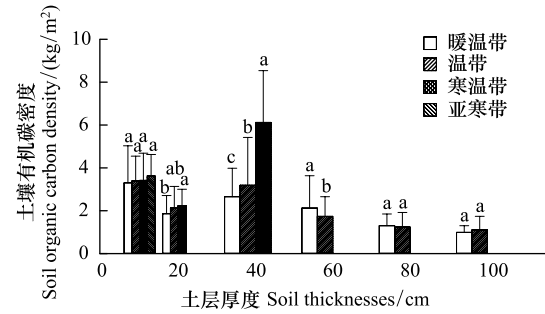


图4 气候带对 SOCD 的影响

Fig.4 Effect of climatic zone on SOCD on the northern slope of Taibai Mountain

2.4 植被带对 SOCD 的影响

植被带对太白山北坡的 SOCD 影响显著,在 0—10 cm 土层,SOCD 在低山扰动带 (3.28 kg/m^2)、锐齿栎林带 (3.38 kg/m^2)、高山针叶林带 (3.30 kg/m^2) 和高山草甸带 (3.63 kg/m^2) 之间的差异不明显 ($P>0.05$),但是与混交林带 (2.83 kg/m^2) 和桦木林带 (4.13 kg/m^2) 的差异明显 ($P<0.05$);在 10—20 cm 土层,SOCD 在桦木林带最高高达 2.46 kg/m^2 ,在低山混交林带最低仅为 1.86 kg/m^2 ,而在锐齿栎林带 (2.00 kg/m^2)、混交林带 (2.15 kg/m^2) 和高山针叶林带 (2.23 kg/m^2) 之间的差异不明显 ($P>0.05$);在 20—40 cm 土层,较低山扰动带的 SOCD 而言 (2.65 kg/m^2),锐齿栎林带 (3.06 kg/m^2)、混交林带 (3.28 kg/m^2)、桦木林带 (4.89 kg/m^2) 和高山针叶林带 (5.97 kg/m^2) 的 SOCD 分别提高了 15%、24%、85% 和 125%;在 40—60 cm 土层,低山扰动带 (2.12 kg/m^2)、混交林带 (2.35 kg/m^2) 和桦木林带 (2.33 kg/m^2) 的 SOCD 分别是锐齿栎林带 (1.42 kg/m^2) SOCD 的 1.49、1.65 和 1.64 倍;在 60—80 cm 土层,低山扰动带 (1.30 kg/m^2) 和混交林带 (1.59 kg/m^2) 的 SOCD 依次较锐齿栎林带 (1.18 kg/m^2) 的 SOCD 提高了 10% 和 35%;在 80—100 cm 土层,混交林带 (1.52 kg/m^2) 的 SOCD 分别是低山扰动带 (0.99 kg/m^2) 和锐齿栎林带 (1.04 kg/m^2) SOCD 的 1.54 和 1.46 倍。

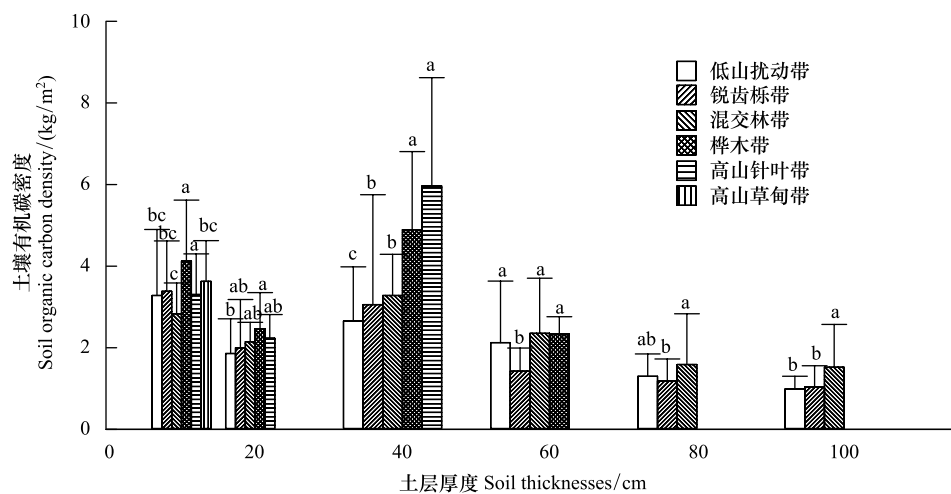


图5 植被带对 SOCD 的影响

Fig.5 Effect of vegetation zone on SOCD on the northern slope of Taibai Mountain

2.5 土层深度对 SOCD 的影响

在太白山北坡上,随着海拔梯度的增加,土层深度发生了显著的改变 ($P<0.05$),平均从低山区的 78 cm,减少到中山区的 33 cm,然而在高山区仅有 10 cm,减少幅度分别达 87%和 70% (图 6)。随着土层深度的改变,总 SOCD 随着海拔梯度的增加呈现出减少的趋势 ($P<0.05$),且在低山区 (35.45 kg/m^2)和中山区 (28.84 kg/m^2)的总 SOCD 分别较高山区 (12.29 kg/m^2)的总 SOCD 减少了 65%和 57% (图 6)。但是,相应的单位土层深度上的 SOCD 却呈现出增加的趋势,从低山区的 0.51 kg/m^2 ,增加到中山区的 0.87 kg/m^2 ,进而增加到高山区的 1.23 kg/m^2 ,增加幅度依次为 141%和 41% (图 6)。

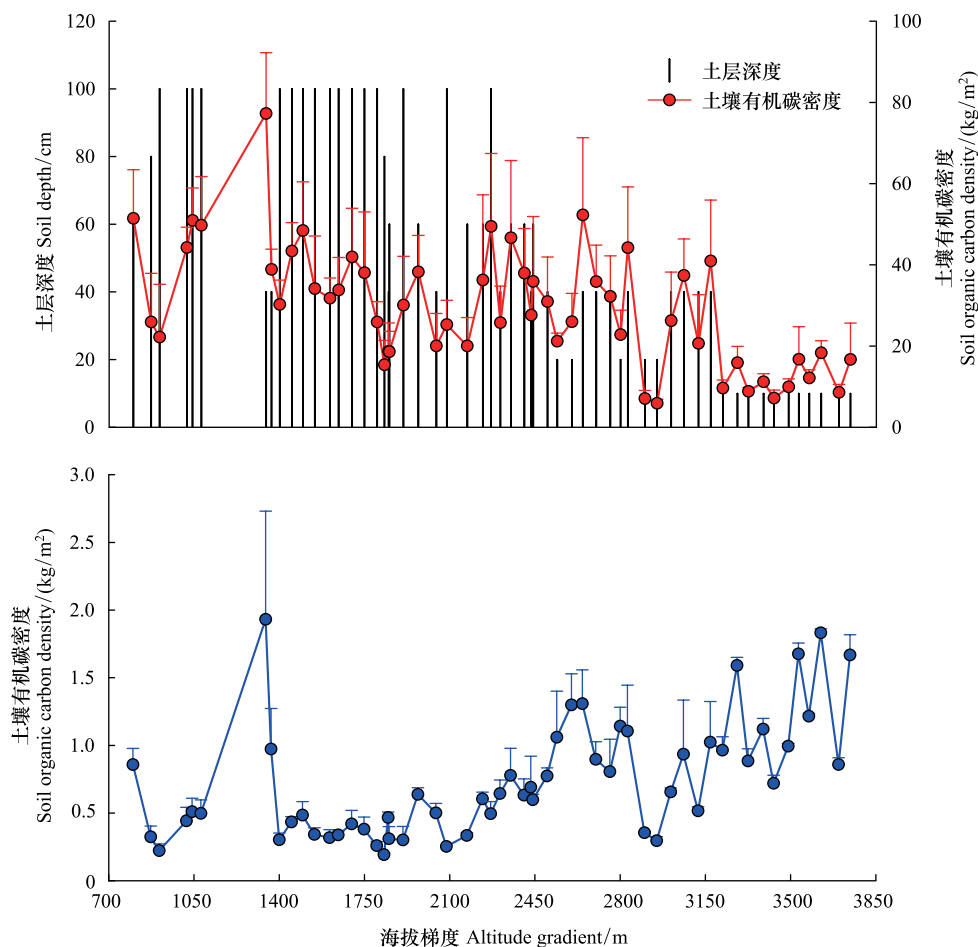


图 6 海拔梯度对土层深度和 SOCD 的影响

Fig.6 Effect of altitude gradient on soil depths and SOCD on the northern slope of Taibai Mountain

土层深度、总 SOCD 和单位土层深度上的 SOCD 在不同植被带下也具有类似的变化规律,土层深度在低山扰动带下平均 90 cm、在锐齿栎林带下平均为 80 cm、在混交林带下平均为 66 cm、在桦木林带下平均为 38 cm、在高山针叶林带下平均为 24 cm、而在高山草甸下仅有 10 cm,降低幅度分别高达 89%、88%、85%、74%和 58%。与此相对应的,总 SOCD 在不同植被带下呈现出减少的趋势,且总 SOCD 在低山扰动带下平均为 40.75 kg/m^2 、在锐齿栎林带下平均为 34.41 kg/m^2 、在混交林带下平均为 33.25 kg/m^2 、在桦木林带下平均为 30.69 kg/m^2 、在高山针叶林带下平均为 20.93 kg/m^2 ,而在高山草甸下平均仅为 14.50 kg/m^2 。但是,单位土层深度上的 SOCD 在不同植被带下却呈现出增加的趋势,且 SOCD 在低山扰动带下、锐齿栎林带下、混交林带下、桦木林带下、高山针叶林带下和高山草甸下平均依次为 0.48 kg/m^2 、 0.51 kg/m^2 、 0.55 kg/m^2 、 0.86 kg/m^2 、 0.91 kg/m^2 和 1.45 kg/m^2 ,增加幅度分别为 6%、15%、79%、90%和 202%。

3 讨论

本研究结果表明,在太白山北坡上,随着海拔梯度的增加 SOCD 呈现出增加的趋势 ($y = 0.001x + 0.52$, $R^2 = 0.51$, $P < 0.0001$),这与已有的研究结果基本相类似^[6-7]。随着海拔梯度的改变(800—3800 m),土壤微气候、植被带、土壤理化性质也会发生相应的改变,而这些因素均会对 SOCD 产生影响^[3, 10, 12]。研究结果表明,太白山北坡上的 SOCD 在不同气候带下呈现出亚寒带>寒温带>温带>暖温带的趋势,这是因为不同气候带下的土壤微环境差异明显,例如年平均土壤温度在四个气候带下依次为 0.22 °C、2.78 °C、8.21 °C、13.72 °C,而较低的土壤温度可能通过降低土壤微生物活动而有利于土壤有机质的积累^[28-29]。此外,太白山北坡上的 SOCD 因植被带差异明显,而植被主要通过凋落物的输入(地上和地下)和凋落物的生化性质(木质素含量和碳氮比等因素)两个方面影响土壤有机碳的积累^[30-32],且进一步研究发现,SOCD 与地上部凋落物现存量呈现出抛物线关系 ($y = -0.00005x^2 + 0.09x - 1.69$, $R^2 = 0.89$, $P < 0.05$)。气候带和植被带的改变必然会导致土壤的理化性质也会发生相应的改变(粘粒含量、土壤容重、土壤温度等因素),而这些因素对 SOCD 的影响不容忽视^[33]。通过对数据的进一步挖掘发现,太白山北坡上的 SOCD 与土壤粘粒含量 ($y = 48.28x + 2.22$, $R^2 = 0.70$, $P < 0.001$)、土壤 pH ($y = 22.34x - 105.53$, $R^2 = 0.41$, $P < 0.05$)、土壤容重 ($y = 20.17x + 12.22$, $R^2 = 0.89$, $P < 0.01$)、土壤温度 ($y = 1.87x + 17.36$, $R^2 = 0.90$, $P < 0.0001$)均呈线性关系,这与已有的研究结果相类似^[33-34]。

除了海拔梯度、气候带、植被带、土壤理化性质以外,土层厚度和土层深度也是影响 SOCD 的一个重要因素。在本研究中,SOCD 基本呈现出随着土层厚度的增加而减少的趋势(图 2),且降低幅度高达 14%—70%,这与已有的研究结果相类似^[30, 35]。SOCD 在不同土层厚度下的分布特征可能与地下根系凋落物^[30]、土壤微生物群落结构^[36]、土壤水分含量^[17]、土壤温度^[17]以及土壤养分含量^[17]在土壤剖面中的分布特征密切相关。例如,在砖窑沟小流域内,有研究发现地下根系生物量随着土层厚度的增加呈现出减少的趋势,平均有超过 64%的地下根系生物量分布在 0—40 cm 土层,而仅有 36%的地下根系生物量分布在 40—100 cm 土层^[30]。

在太白山北坡上,随着海拔梯度的增加土层深度呈现出减少的趋势,平均从低山区的 78 cm,减少到中山区的 33 cm,然而在高山区仅有 10 cm,减少幅度分别达 87%和 70%(图 6),这与已有的研究结果相类似^[16-17, 37]。例如,在鼎湖山自然保护区,土层深度的分布范围大概为 18—105 cm,集中分布于 45—80 cm,且土层深度最低分布在海拔高度最高的地点,仅有 20—60 cm,土层深度最高的分布在山脚(海拔高度最低),高达 45—100 cm,基本呈现出随着海拔梯度的增加而减少的趋势^[37]。与此相对应,总 SOCD 随着海拔梯度的增加呈现出减少的趋势,平均总 SOCD 在中山区和高山区分别减少了 65%和 57%,但是单位土层深度上的 SOCD 却呈现出增加的趋势,平均单位土层深度上的 SOCD 在高山区和中山区分别增加了 141%和 41%(图 6),因此在土层深度受限的土石山区土层深度对土壤有机碳储量的影响不容忽视^[6]。例如,在全球尺度上,土壤有机碳储量在 0—300 cm 土层内 (2344×10^{15} Pg C)分别是在 0—200 cm 土层 (1993×10^{15} Pg C)和 0—100 cm 土层内 (1502×10^{15} Pg C)的 1.2 倍和 1.6 倍^[15],这一结论也间接证明了土层深度在估算土壤有机碳储量的重要性^[14]。

土层深度受局地地形条件(坡度、坡向、地形部位)影响显著^[38],例如张文太课题组以新疆的草地生态系统为研究对象,利用 GIS 技术和相关分析的方法,探讨了海拔高度、坡度、坡向、平面曲率和剖面曲率等 5 个地形特征参数与土层深度之间的相关性,研究结果表明在塔里木盆地的北部,海拔高度、坡度和坡向与土层深度相关关系均为极显著水平 ($P < 0.01$)^[39]。此外,土层深度的这种异质性可以通过土壤水分、土壤养分以及地下空间可利用性等方面对地上植物群落的物种组成和分布产生直接影响^[40],从而影响土壤有机碳储量的空间分布特征^[30]。不同海拔梯度下,土层深度与土壤有机碳储量之间的关系可能与不同土层深度内的地下根系凋落物量、土壤微生物群落结构和土壤养分含量等因素的数量差异有关:1) 地下根系凋落物量^[35],例如在黄土高原丘陵沟壑区的灌木、乔木、灌草以及草本植被下研究发现,地下根系凋落物量随着土层深度的增加呈现出对数减少的趋势 ($P < 0.05$),且在灌木植被、乔木植被、灌草植被以及草本植被下,表层(0—20 cm)的细

根凋落物量占剖面 (0—100 cm) 根系凋落物量的比例依次为 65%、63%、62% 和 81%^[41]; 2) 土壤微生物的群落结构^[42], 例如在黄土高原的人工刺槐林内, 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增加的趋势, 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^[36]; 3) 土壤养分含量, 例如在莽山国家森林公园的常绿阔叶林生态系统中, 底层 (60—100 cm) 的水解氮、有效磷和有效钾占整个剖面的 (0—100 cm) 的比例依次 50%、45% 和 91%^[43]。除了上述的地下根系凋落物量、土壤微生物群落结构和土壤养分含量以外, 不同土层深度内的土壤温度^[16]、土壤水分含量^[17] 以及土壤氧气浓度^[36] 的差异也可能导致不同土层深度内的土壤有机碳储量不同, 但具体原因有待我们作进一步的试验进行论证。

4 结论

太白山北坡上 SOCD 的变化范围为 0.24—14.99 kg/m², 均值为 2.23 kg/m², 变异系数高达 76%, 且 SOCD 呈现出随着海拔梯度的增加而增加的趋势。太白山北坡上 SOCD 的海拔梯度格局与气候带、植被带、土壤理化性质、土层厚度等因素有关。此外, 在太白山北坡上土层深度和总 SOCD 随着海拔梯度的增加呈现出减少的趋势, 但是单位土层深度上的 SOCD 却呈现出增加的趋势。上述研究结果对准确估算土石山区的土壤碳储量具有重要的理论和实际意义。

致谢: 感谢王阳妮、张瑜、封旭升对采样和试验给予的帮助, 感谢张蓓蓓教授对写作的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Barthlott W, Lauer W, Placke A. Global distribution of species diversity in vascular plants: towards a world map of phytodiversity. *Erdkunde*, 1996, 50(4): 317-327.
- [2] Viviroli D, Weingartner R, Messerli B. Assessing the hydrological significance of the world's mountains. *Mountain Research and Development*, 2003, 23(1): 32-40.
- [3] Körner C. The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(11): 569-574.
- [4] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [5] IPCC. Land Use, Land Use Change, and Forestry. Special Report, Inter-Governmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [6] Zimmermann M, Leifeld J, Conen F, Bird M I, Meir P. Can composition and physical protection of soil organic matter explain soil respiration temperature sensitivity? *Biogeochemistry*, 2012, 107(1/3): 423-436.
- [7] 朱凌宇, 潘剑君, 张威, 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究. *环境科学*, 2013, 34(2): 668-675.
- [8] Gutiérrez-Girón A, Díaz-Pinés E, Rubio A, Gavilán R G. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils. *Geoderma*, 2015, 237-238: 1-8.
- [9] Djukic I, Zehetner F, Tatzber M, Gerzabek M H. Soil organic - matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(1): 30-38.
- [10] 程浩, 张厚喜, 黄智军, 徐自坤, 杨强, 刘爱琴. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征. *森林与环境学报*, 2018, 38(2): 135-141.
- [11] Tian Q X, He H B, Cheng W X, Bai Z, Wang Y, Zhang X D. Factors controlling soil organic carbon stability along a temperate forest altitudinal gradient. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 18783.
- [12] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和文祥, 耿增超. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征. *土壤学报*, 2017, 54(1): 160-170.
- [13] 厉桂香, 马克明. 土壤微生物多样性海拔格局研究进展. *生态学报*, 2018, 38(5): 1521-1529.
- [14] Premrov A, Cummins T, Byrne K A. Assessing fixed depth carbon stocks in soils with varying horizon depths and thicknesses, sampled by horizon. *Catena*, 2017, 150: 291-301.
- [15] 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.

- [16] 黄群山, 叶源忠. 浅析武夷山山地土壤理化性质的垂直分异. 太原师范学院学报: 自然科学版, 2008, 7(3): 128-131.
- [17] 周运超, 罗美. 喀斯特小流域土壤厚度的影响因素. 山地农业生物学报, 2017, 36(3): 1-5.
- [18] 耿增超, 姜林, 李珊珊, 余雕, 侯磊. 祁连山中段土壤有机碳和氮素的剖面分布. 应用生态学报, 2011, 22(3): 665-672.
- [19] 雷梅, 陈同斌, 冯立, 常庆瑞, 阎湘. 太白山北坡成土因素及不同土壤垂直带谱的比较. 地理研究, 2001, 20(5): 583-592.
- [20] 韩福琦, 李兆元. 太白山的气候. 陕西气象, 1980, (6): 3-7.
- [21] 岳明. 秦岭 植物垂直带谱完整复杂. 森林与人类, 2015, (2): 76-81.
- [22] 任学敏. 太白山主要植物群落数量分类及其物种组成和丰富度的环境解释[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [23] 曹晓娟, 刘建军, 杨梅. 太白山 5 种杜鹃属植物叶片光合特性及解剖结构的生态适应性研究. 西北植物学报, 2009, 29(12): 2483-2491.
- [24] 尚廉斌, 王得祥, 樊璐, 刘建军, 曹支敏, 陈增宏. 秦岭太白山北坡五种林分凋落叶分解状况初步研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 64-68.
- [25] 余雕, 朱盼盼, 程苗苗, 李浩宏, 耿增超. 太白山不同林分土壤肥力状况比较研究. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 7-12.
- [26] 郭建明, 胡理乐, 林伟, 郑博福, 李俊生. 秦岭太白红杉林土壤有机碳密度研究. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1464-1469.
- [27] 屈冉, 李俊生, 罗遵兰, 吴晓蕾, 赵彩云, 汤博. 秦岭太白山土壤 CO₂ 的释放特征及温度的影响. 华北农学报, 2010, 25(2): 188-193.
- [28] Oldfield E E, Crowther T W, Bradford M A. Substrate identity and amount overwhelm temperature effects on soil carbon formation. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 124: 218-226.
- [29] Wang Q K, Liu S E, Tian P. Carbon quality and soil microbial property control the latitudinal pattern in temperature sensitivity of soil microbial respiration across Chinese forest ecosystems. Global Change Biology, 2018, 24(7): 2841-2849.
- [30] 张彦军, 郭胜利. 复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献. 环境科学, 2019, 40(2): 961-969.
- [31] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. Geoderma, 2002, 107(1/2): 109-141.
- [32] Hu Y L, Zeng D H, Ma X Q, Chang S X. Root rather than leaf litter input drives soil carbon sequestration after afforestation on a marginal cropland. Forest Ecology and Management, 2016, 362: 38-45.
- [33] 薛丽佳, 高人, 杨玉盛, 尹云锋, 马红亮, 刘燕萍. 武夷山土壤有机碳和黑碳的分配规律研究. 林业科学研究, 2011, 24(3): 399-403.
- [34] 姜泽宇. 长白山森林土壤有机碳空间分布及其矿化特征研究[D]. 延吉: 延边大学, 2016.
- [35] Wang Z Q, Guo S L, Sun Q Q, Li N N, Jiang J S, Wang R, Zhang Y J, Liu Q F, Wu D F, Li R J, Du L L, Zhao M. Soil organic carbon sequestration potential of artificial and natural vegetation in the hilly regions of Loess Plateau. Ecological Engineering, 2015, 82: 547-554.
- [36] 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. 水土保持学报, 2004, 18(6): 128-131.
- [37] 方运霆, 莫江明, Brown S, 周国逸, 张倩媚, 李德军. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征. 生态学报, 2004, 24(1): 135-142.
- [38] 李晓莎, 许中旗, 赵娉, 李校. 冀北山地干旱阳坡土壤厚度及土壤养分的空间异质性. 河北农业大学学报, 2018, 41(1): 24-30, 48-48.
- [39] 柴强, 盛建东, 武红旗, 刘耘华, 张文太. 新疆草地土壤厚度及与地形特征的相关性. 中国草地学报, 2015, 37(5): 18-23.
- [40] 李周, 赵雅洁, 宋海燕, 张静, 陶建平, 刘锦春. 喀斯特土层厚度异质性对草地群落结构和优势种生长的影响. 草业科学, 2017, 34(10): 2023-2032.
- [41] 王彦丽. 不同植被恢复措施下剖面根系与 SOC 的分布特征. 水土保持研究, 2013, 20(6): 19-23, 43-43.
- [42] Hsiao C J, Sassenrath G F, Zeglin L H, Hettiarachchi G M, Rice C W. Vertical changes of soil microbial properties in claypan soils. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 121: 154-164.
- [43] 谢寄托. 莽山常绿阔叶林土壤养分分布规律研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.