

南京林业大学学报(自然科学版)

Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)

ISSN 1000-2006,CN 32-1161/S

《南京林业大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 南水北调中线工程水源地土壤有机碳密度空间分异及驱动因素研究
作者: 刘珂, 李明阳, 李灵, 田康, 樊亚男, 王志刚, 瞿明凯, 黄标
收稿日期: 2020-12-19
网络首发日期: 2021-12-16
引用格式: 刘珂, 李明阳, 李灵, 田康, 樊亚男, 王志刚, 瞿明凯, 黄标. 南水北调中线工程水源地土壤有机碳密度空间分异及驱动因素研究[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20211216.1010.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.12302/j.issn.1000-2006.202012016

南水北调中线工程水源地土壤有机碳密度空间分异及驱动因素研究

刘珂¹, 李明阳^{1*}, 李灵^{2*}, 田康³, 樊亚男³, 王志刚⁴, 瞿明凯³, 黄标³

(1. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 2100037; 2. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 武夷山 3543003; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤环境与污染修复重点实验室, 江苏 南京 210008; 4. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要:【目的】土壤固碳在抵消全球温室气体排放上具有巨大的潜力, 气候过渡带的土壤碳储量对气候变化的响应更为迅速和敏感, 南水北调中线工程水源地处于我国北亚热带与暖温带过渡区, 通过分析中国南水北调中线工程水源地较大空间尺度土壤有机碳密度的空间分布特征及驱动因素, 为该区域的土地资源合理利用及土壤有机碳(SOC)管理提供科学依据, 及正确评估气候过渡带下生态系统的碳循环提供参考。【方法】在考虑南水北调中线工程水源地海拔、土壤类型、土地利用等空间因素的基础上布设样地, 通过野外取样和室内分析, 借助 GIS 研究区域土壤有机碳密度(SOCD)空间分布格局, 通过利用地理探测器模型分析各影响因子对土壤有机碳密度的解释力及各因子之间相互作用程度的差异, 判定影响研究区 SOCD 空间分布的主要驱动因子, 揭示其空间差异及随海拔、土壤类型、土地利用及森林类型的变化规律。【结果】①南水北调中线工程水源地 0~20 cm 与 ≥20~40 cm 土层 SOCD 分别为 4.18 kg/m² 和 2.67 kg/m², 其中 0~20 cm 土层 SOCD 高出全国平均水平(2.67 kg/m²)的 56.55%; ②SOCD 呈现南北林区高, 中间农田和草地低的格局, SOCD 大于 10 kg/m² 集中在海拔 ≥1 000~2 000 m 的林地, 小于 1 kg/m² 的集中在海拔 <500 m 的草地。在海拔上, SOCD 随海拔梯度升高先增大后减小, 0~20 cm 与 ≥20~40 cm 土层 SOCD 均在海拔 ≥1 500~2 000 m 出现峰值(7.32 kg/m², 4.94 kg/m²); 在土壤类型上, SOCD 最大的是石灰(岩)土, 最小的是褐土, 黄棕壤和棕壤在 0~20 cm 土层 SOC 储量最高, 分别为 2.005 Pg 和 0.815 Pg, 二者占总储量的 72.83%; 在土地利用类型上, 林地和农田是主要的土地利用方式, 林地 0~20 cm 与 ≥20~40 cm 土层 SOCD 分别为 4.87 kg/m² 和 3.05 kg/m², 农田分别为 2.75 kg/m² 和 2.00 kg/m², 比林地分别下降 77.09% 和 52.50%, 林地碳储量占 87.48%, 农田占 12.02%; ③对 SOCD 空间分布解释力较大的是海拔(0.25)和土地利用(0.20), 其次是土壤黏粒(0.11)。不同驱动因子在交互作用下的解释力明显高于单因素的解释力。【结论】海拔和土地利用是影响南水北调中线工程水源地 SOCD 空间格局的主导因子, 不同驱动因子交互后呈现双因子协同增强或 1+1>2 的非线性协同增强的效应。农田 SOCD 明显低于林地, 因此, 应加强研究区内生态工程建设, 进行林地保护和植被恢复, 提高南水北调中线工程水源地土壤碳固存能力。

关键词: 土壤有机碳密度; 空间分异; 地理探测器; 水源地; 南水北调中线工程

中图分类号: S714

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatial heterogeneity of the soil organic carbon density and its driving factors in the water source area of the middle route of South-to-North Water Diversion Project

LIU Ke¹, LI Mingyang^{1*}, LI Ling^{2*}, TIAN Kang³, FAN Yanan³, WANG Zhigang⁴, QU Mingkai³, HUANG Biao³

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan 3543003, China; 3. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: 【Objective】 Soil carbon sequestration has great potential in offsetting global greenhouse gas emissions. The soil carbon storage in the climate transition zone is more rapid and sensitive to climate change. The water source of the Middle Route Project of South-to-North Water Transfer is located in the transition zone between north subtropical and warm temperate zones in China. The aim of analyzing the spatial distribution characteristics and driving factors of soil organic carbon density on a large spatial scale in the water source area of the middle route of South-to-North Water Transfer Project in China is to reveals its spatial differences and the change law with altitude, soil type, land use and forest type, so as to provide a scientific basis for the rational utilization of land resources and soil organic carbon (SOC) management in this area, which provides a reference for correctly evaluating the carbon

收稿日期 Received: 2020-12-19 修回日期 Accepted: 2021-12-14

基金项目: 科技基础性工作专项(2015FY110400-2)。

第一作者: 刘珂(2489838513@qq.com)。*通信作者: 李明阳(lmy196727@126.com), 教授, 负责研究方法设计及论文修改指导, ORCID(0000-0002-9782-3235); 李灵(haodou_25@126.com), 教授, 负责技术路线指导及审改, ORCID(0000-0002-1946-1750)。

cycle of ecosystem under the climate transition zone. The spatial distribution and its driving factors of the soil organic carbon density (SOCD) were explored to provide scientific basis for the correct assessment of ecosystem carbon cycle in climate transition zone.

【Method】 Based on the comprehensive consideration of spatial factors such as elevation, soil type and land use, the spatial variations of SOCD in this region were evaluated by field sampling and indoor analysis with the help of GIS, and the main driving factors affecting the spatial distribution of SOCD in the study area were determined by analyzing the explanatory power of various influencing factors on soil organic carbon density and the difference of interaction degree between various factors by using geographic detector model. **【Result】** ① Results showed that the average SOCD in 0 ~ 20 cm and $\geq 20 \sim 40$ cm soil layers were 4.18 kg / m² and 2.67 kg / m² respectively, in which the SOCD of 0 ~ 20 cm soil layer was 56.55 % higher than the national average level (2.67 kg / m²). ② Over the entire region, the SOCD was higher in forest of the north and south areas, and lower in farmland and grassland of the middle area. SOCD greater than 10 kg/m² is concentrated in forest land with altitude $\geq 1\ 500 \sim 2\ 000$ m, and less than 1 kg/m² is concentrated in grassland with altitude < 500 m. The SOCD firstly increased and then decreased with increasing elevation. The SOCD of 0 ~ 20 cm and $\geq 20 \sim 40$ cm soil layers showed peak values (7.32 kg/m² and 4.94 kg/m²) at an altitude of $\geq 1\ 500 \sim 2\ 000$ m; In terms of soil types, the average SOCD of limestone soil is the largest and that of cinnamon soils is the smallest. The SOCD storage of yellow-brown earths and brown earths in 0 ~ 20 cm soil layer are the highest, which are 2.005 Pg and 0.815 Pg respectively, accounting for 72.83% of the total storage. In terms of land use types, forest and farmland were the main ways of land use. The SOCD of 0 ~ 20 cm and $\geq 20 \sim 40$ cm soil layers in forest land were 4.87 kg/m² and 3.05 kg/m² respectively, and that of farmland were 2.75 kg/m² and 2.00 kg/m² respectively which were 77.09% and 52.50% lower than that of forest land and the SOC storage of forestland accounted for 87.48% of total C storage, followed by farmland (12.02%). ③ The most powerful explanation for the spatial distribution of SOCD is altitude (0.25) and land use (0.20), followed by soil clay (0.11). The explanatory power of different driving factors under interaction is significantly higher than that of single factor. **【Conclusion】** Altitude and land use were the main driving factors affecting SOCD spatial pattern in this region. After interaction of different driving factors, there was a synergistic effect of two factors or a nonlinear synergistic effect of 1 + 1 > 2. SOCD of farmland is significantly lower than that of forest land. Therefore, ecological engineering construction in the study area should be strengthened, forest land protection and vegetation restoration should be carried out, and soil carbon storage capacity of water source in the middle route of south-to-north Water Transfer project should be improved.

Keywords: soil organic carbon density(SOCD); spatial heterogeneity; geographic detector model; the water source area; The Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 库是陆地碳库的主要组成部分, 约是陆地植被碳库的 3 倍、大气碳库的 2 倍, 土壤排放于大气中 CO₂ 的年通量约是化石燃料燃烧释放量的 10 倍^[1], 对气候变化产生显著影响。全球固碳水平为 0.24 t/(hm² · a), 土壤固碳达 0.4~0.6 t/(hm² · a)时可抵消全球当年温室气体的排放量^[2], 土壤仍具有较大的固碳潜力。因此, SOC 库储量、土壤有机碳密度 (soil organic carbon density, SOCD) 分布规律等成为当前的研究热点。由于不同研究区的气候 (如气温和降水)、地形 (海拔、坡度、坡向、坡位等)、植被、土壤类型、土壤理化性质、土地利用方式等的差异, 导致 SOCD 大小、分布特征等存在较大差异。SOCD 随海拔梯度的增加呈增加^[3]、减少^[4]、先增加后减小^[5]、先减小后增加的“V”形^[6]的趋势。从耕地、园地、林地到草地, SOCD 依次增加, 天然林转变为其他土地利用类型后, SOCD 下降了 25.6%~51.2%^[7]。梁晨等^[8]研究发现, SOCD 在不同的森林类型分布大小表现为阔叶林 > 针叶林 > 针阔混交林。以往有关土壤碳储量的研究主要集中在典型气候带的生态系统, 在气候过渡带开展土壤碳储量的研究仍较为缺乏。作为生态脆弱区和敏感区域, 气候过渡带的土壤碳储量对气候变化的响应更为迅速和敏感^[9]。

南水北调中线工程是我国经济建设中一项规模宏大的跨流域水资源配置战略工程, 工程于河南省淅川县渠首开挖干渠, 跨越长江、淮河、黄河、海河 4 大流域, 向唐白河区、淮河区、海河 3 个受水区输送, 极大地缓解了华北平原的河南、河北、北京、天津 4 个省 (市) 的水资源短缺问题。丹江口水库水源地位于北亚热带向暖温带的气候过渡区, 地貌、植被、土壤、土地利用类型多样, 为研究土壤有机碳空间格局提供了理想场所。本研究通过对南水北调中线工程水源地较大空间尺度的野外调查、采样和分析, 探索 SOCD 的分布特征及驱动因素, 揭示其空间差异随海拔、土壤类型、土地利用及森林类型的变

化规律，以期为研究区保护和有效利用土地资源，改善生态环境及正确评估气候过渡带上的生态系统碳循环提供基础数据和科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于南水北调中线工程水源地，地理位置 $106^{\circ}5'19''\sim 111^{\circ}49'48''E$ ， $31^{\circ}25'0''\sim 34^{\circ}11'10''N$ ，地处河南、湖北、陕西三省交界处，总面积约 $9.52\times 10^6\text{ km}^2$ （图 1A）。该区处于我国北亚热带与暖温带过渡区，年均气温 15.8°C ，年均降水量 804.3 mm 。区域南北高中间低，西部高东部低，区内地貌类型多样，山区地形复杂，垂直高差大，海拔 $133\sim 3\ 549\text{ m}$ （图 1B）。根据水源地调查研究情况，将海拔分为 $< 500\text{ m}$ 、 $\geq 500\sim 1\ 000\text{ m}$ 、 $\geq 1\ 000\sim 1\ 500\text{ m}$ 、 $\geq 1\ 500\sim 2\ 000\text{ m}$ 和 $\geq 2\ 000\text{ m}$ 等 5 个梯度。

研究区的土壤类型按照发生分类（系统分类）的方法，分为暗棕壤（冷凉湿润锥形土）、棕壤（筒育湿润淋溶土）、褐土（筒育干润淋溶土）、黄褐土（黏磐湿润淋溶土）、石灰（岩）土（钙质湿润淋溶土）、粗骨土（湿润正常新成土）、黄棕壤（铁质湿润淋溶土）、水稻土（铁聚水耕人为土）、新积土（潮湿冲积新成土）、紫色土（紫色湿润锥形土）等（图 1C）^[10]。其中，以黄棕壤和棕壤为主，分别占总面积的 53.97% 和 16.44% 。植被分布和土地利用具有明显随海拔变化的特征，高强度的土地利用类型如农田主要集中于海拔 $1\ 000\text{ m}$ 以下的平缓地区，而高海拔地区主要是林地。土地利用方式主要有林地、草地、灌丛、农田（图 1B），其中森林类型（林地）包括阔叶林、针叶林和针阔混交林（混交林）。

1.2 样品采集与测定

2015~2018 年之间，完成土壤样品采集和分析工作，土壤采样点布置如图 1A。根据 Envisat 卫星 2009 年的地表覆盖数据（林地面积大于 50% ），充分考虑海拔、土壤类型、土地利用方式、森林类型、分布及结构等基础上布设样地，共采集 399 个表层（ $0\sim 20\text{ cm}$ ）样点（包括 252 个森林、35 个灌丛、20 个草地和 92 个农田样点）和 374 个亚表层（ $\geq 20\sim 40\text{ cm}$ ）样点（包括 243 个森林、23 个灌丛样地、20 个草地和 88 个农田样点）（图 1A），在样方内采集至少 5 处 $0\sim 20\text{ cm}$ 和 $\geq 20\sim 40\text{ cm}$ 深度的土壤样品，混合缩分至 1 kg 。每个取样点以 GPS 精确定位，土壤样品运回实验室后及时进行风干、研磨、过筛备用。参照文献[11-13]进行相关数据分析，有机质-重铬酸钾-硫酸消化法，土壤颗粒组成-激光粒度仪法，容重-环刀法，pH-电位法^[11]。

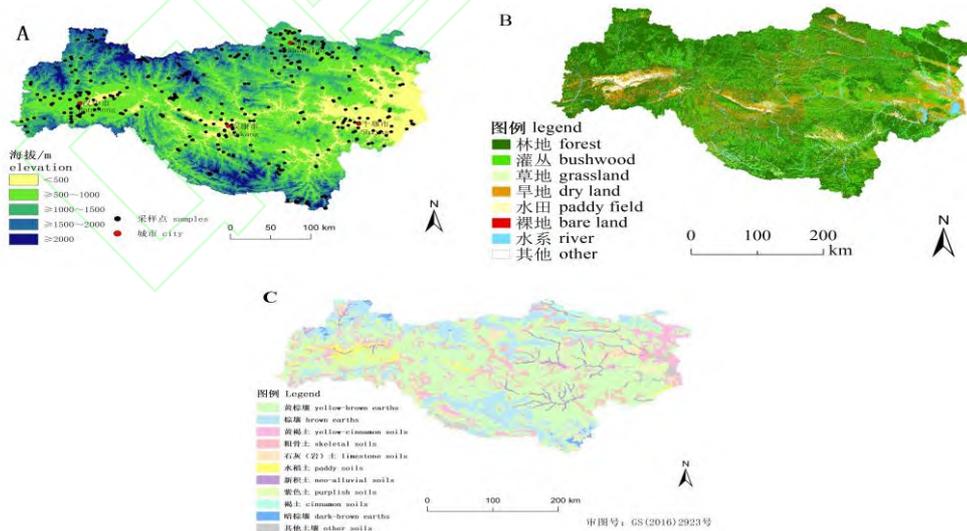


图 1 南水北调水源地研究区采样点分布 (A)，土地利用类型 (B)，土壤类型 (C)

Fig.1 The study region and distribution of sampling sites (A), the land use types (B) and soil types(C) in the water source area of South-North Water Diversion Project

1.3 地理探测器模型分析

地理探测器是探测空间分异性及揭示其背后驱动力的一种统计学方法，本研究采用王劲峰等^[13]研发的地理探测器对研究区土壤有机碳密度（soil organic carbon density, SOCD）的影响因素进行交互探测分析，探测两因子间的交互作用、程度和类型，计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中： q 为探测因子 A 的探测力值， $q \in [0, 1]$ ， q 值越大，表明因素 A 对 SOCD 影响度越高； N 和 N_h 分别为总样本数和子区域样本数； σ_h^2 为因子 A 在样本 h 内的离散方差； L 为各因素的类型。

1.4 数据处理与分析

不同层次土壤有机碳密度计算公式为：

$$C_{i,\text{SOCD}} = C_i \times D_i \times H_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (2)$$

式中： $C_{i,\text{SOCD}}$ 为第 i 层土壤有机碳密度， kg/m^2 ； i 为土壤层次； C_i 为第 i 层有机碳含量， g/kg ； D_i 为第 i 层土壤容重， g/cm^3 ； H_i 为第 i 层土层厚度， cm ； G_i 为第 i 层土层中直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比，%。

在众多的插值模型中，由于克里金内插以空间结构分析为基础，权重的计算不仅基于待测点和已知点之间的空间距离，还充分考虑了已知点位置和属性值的整体空间分布特征，因此插值精度往往高于反距离权重、样条函数等插值模型。在地形起伏较大的山区，普通克里金插值的模型优于指数、线状、高斯模型^[12]。在 ArcGIS 10.6 软件支持下，选用普通克里金的球面模型对采样点进行插值获得 SOCD 空间分布图，土壤类型、数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）、土地利用及森林类型数据分别来自于国家地理空间数据云网站的全国 1:100 万土壤类型数据、水源地 DEM（90m 分辨率）和水源地 Landsat 影像（30 m 分辨率）的数字化。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳密度统计及空间分布特征

研究发现，南水北调中线工程水源地表层 SOCD 均值为 4.18 kg/m^2 ，在草地中为最小值（ 0.29 kg/m^2 ），在林地中为最大值（ 17.07 kg/m^2 ），最小值和最大值样点均位于水源地东南部，变幅达 16.78 kg/m^2 ；亚表层的（ $\geq 20 \sim 40 \text{ cm}$ ）SOCD 介于 $0.21 \sim 13.75 \text{ kg/m}^2$ ，均值为 2.67 kg/m^2 ，变幅为 13.54 kg/m^2 。表层（ $0 \sim 20 \text{ cm}$ ）的 SOCD 显著高于 \geq 亚表层的（ $P < 0.05$ ），前者是后者的 1.57 倍，土壤有机碳具有明显的表聚性，这与以往的研究结果^[14]一致。表层与亚表层的 SOCD 变异系数分别为 56.94% 和 60.69%，均属于中等空间变异，表层 SOCD 变异程度小于亚表层的。研究区表层 SOCD 高于谢宪丽等^[15]根据第二次土壤普查数据计算的全国平均水平（ 2.67 kg/m^2 ），是全国平均水平的 1.57 倍，高于陕西省平均水平（ 3.89 kg/m^2 ），低于湖北省平均水平（ 4.52 kg/m^2 ）^[6]。研究区表层平均 SOCD 最高的是林地，高于相应土层的江西省林地平均水平（ 4.52 kg/m^2 ）^[17]，低于我自然土壤表层平均 SOCD（ 5.70 kg/m^2 ）。表层与亚表层 SOCD 空间分布基本一致，具有较高的非均质性特征，呈现南北高、中间低的格局（图 2）。高程上，SOCD 在高海拔区域较高，在低海拔区域较低；土壤类型上，石灰（岩）土、暗棕壤及棕壤较高，褐土、黄褐土及新积土较低；土地利用上，林地高，草地低；森林类型上，阔叶林高，针叶林低。

由图 2A 结合图 1 发现，高程上，表层 SOCD 随海拔梯度升高呈先增大后减小的趋势，在 $0 \sim 500 \text{ m}$ 最小，为 3.15 kg/m^2 ；在海拔 $\geq 1500 \sim 2000 \text{ m}$ 最大，为 7.32 kg/m^2 ；在海拔 $\geq 2000 \text{ m}$ ，SOCD 下降；土壤类型上，SOCD 最大的石灰（岩）土与最小的褐土分别为 5.44 kg/m^2 和 3.35 kg/m^2 ，石灰（岩）土的 SOCD 比褐土的高 62.39%；土地利用类型上，SOCD 最大的是林地（ 4.87 kg/m^2 ），最小的是草地（ 1.45 kg/m^2 ），草地的 SOCD 只有林地的 29.77%；森林类型上，SOCD 最大的阔叶林（ 5.35 kg/m^2 ）是最小的针叶林（ 4.43 kg/m^2 ）的 1.21 倍。低海拔地区的多数草地样点 SOCD 低于 1 kg/m^2 。亚表层 SOCD 在高程、土地利用类型及森林类型上的变化规律与表层基本一致，而在土壤类型上，亚表层 SOCD 最大的是棕壤（ 3.69 kg/m^2 ），最小的是新积土（ 1.50 kg/m^2 ），棕壤的 SOCD 是新积土的 2.46 倍。

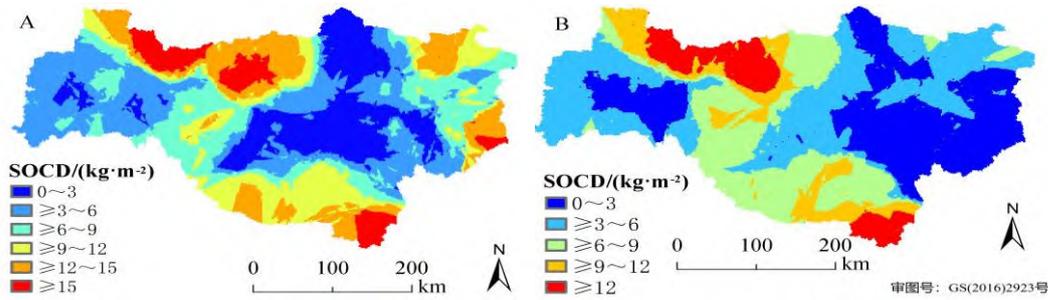


图2 南水北调工程水源地研究区 0~20cm (A) 和 ≥20~40cm (B) 土层 SOCD 的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of SOCD in 0~20cm (A) and ≥20~40cm (B) in the water source area of South-North Water Diversion Project

2.2 不同土壤类型的土壤有机碳密度分布分析

土壤类型对土壤有机碳的影响主要通过土壤结构、养分状况以及土壤理化性质等方面的差异来体现。不同土壤类型的成土过程不同，以及生物地化过程的差别将导致土壤有机碳含量的差异。不同土壤类型表层与亚表层 SOCD 差异显著 ($P < 0.05$)，均随土层深度的增加而降低 (表 1)。不同土壤类型表层 SOCD 均值处于 3.35~5.44 kg/m²，表层 SOCD 最大的是石灰 (岩) 土 (5.44 kg/m²)，最小的是褐土 (3.35 kg/m²) (表 2)，石灰 (岩) 土的 SOCD 是最低的褐土的 1.62 倍。总体上，表层石灰 (岩) 土、棕壤和暗棕壤 SOCD 远大于其他土壤类型的 ($P < 0.05$)。亚表层不同土壤类型 SOCD 均值变化范围在 1.50~3.69 kg/m² 之间，SOCD 最大的是棕壤 (3.69 kg/m²)，最小的是新积土 (1.50 kg/m²)。亚表层棕壤和石灰 (岩) 土 SOCD 基本上与其他土壤类型差异显著 ($P < 0.05$) (表 1)。

表 1 南水北调水源地研究区不同土壤类型有机碳密度及碳储量

Table 1 The SOCD and carbon storage in different soil types in the water source area of South-North Water Diversion Project

土壤类型 soil type	海拔/m elevation	面积/×10 ⁶ hm ² area	面积占比/% area proportion	SOCD/(kg · m ⁻²)		0~20cm 碳储量/Pg carbon storage in 0~20cm	储量比例/% carbon storage percentage
				0~20cm	≥20~40cm		
暗棕壤 dark-brown earths	≥1 500~2 000	0.058	0.60	5.09±2.27 Aa	2.31±0.75 Bb	0.029	0.76
棕壤 brown earths	≥1 000~1 500	1.565	16.44	5.21±2.66 Aa	3.69±2.23 Ba	0.815	21.05
褐土 cinnamon soils		0.097	1.02	3.35±1.71 Ab	2.15±0.83 Bb	0.033	0.84
黄褐土 yellow-cinnamon soils	≥500~1 000	0.711	7.46	3.36±1.88 Ab	2.66±1.29 Bab	0.239	6.17
石灰 (岩) 土 limestone soils		0.454	4.77	5.44±2.51 Aa	3.20±1.65 Ba	0.247	6.38
粗骨土 skeletal soils		0.636	6.68	3.72±1.49 Ab	2.20±0.81 Bb	0.236	6.10
黄棕壤 yellow-brown earths	≥500~1 000	5.138	53.97	3.93±2.19 Ab	2.49±1.42 Bb	2.005	51.78
水稻土 paddy soils	neo-alluvial soils	0.267	2.81	4.64±3.58 Aa	1.82±0.80 Bbc	0.124	3.20
新积土 neo-alluvial soils		0.251	2.64	3.57±2.55 Ab	1.50±0.68 Bc	0.090	2.31
紫色土 purplish soils		0.152	1.60	3.60±1.15 Ab	2.02±0.52 Bb	0.055	1.41

注：不同大写字母表示不同土层有机碳密度的差异显著，不同小写字母表示不同土壤类型 SOCD 的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different capital letters indicate the difference of SOCD in different soil layers, and different small letters indicate the difference of SOCD in different soil types ($P < 0.05$). The same below.

黄棕壤和棕壤是研究区主要的土壤类型，分别占研究区面积的 53.97% 和 16.44%，其表层 SOCD 均高于相应的全国平均水平黄棕壤的 (3.24 kg/m²)、棕壤的 (3.13 kg/m²) [18]，分别是全国平均水平的 1.21 倍和 1.66 倍。其碳储量也是研究区碳库的主要组成部分，有机碳储量分别为 2.005 Pg 和 0.815 Pg，分别占总储量的 51.78% 和 21.05%。石灰 (岩) 土、暗棕壤和水稻土表层 SOCD 较高，但其占总面积的比例仅

为 4.77%、0.60%和 2.81%，在研究区分布较少，表层土壤有机碳储量仅占总储量的 6.38%、0.76%和 3.20%（表 1）。表层与亚表层不同土壤类型 SOCD 在海拔<2 000 m 随海拔梯度的升高呈增大的趋势。在表层，海拔从 $\geq 500\sim 1\ 000$ m、 $\geq 1\ 000\sim 1\ 500$ m 到 $\geq 1\ 500\sim 2\ 000$ m 不同土壤类型 SOCD 均值分别从 3.96 kg/m²、4.97 kg/m²增加到 5.09 kg/m²（表 1）。

2.3 不同土地利用类型的土壤有机碳密度分布分析

不同土地利用是影响土壤有机碳分布的重要因素之一，不同的土地利用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、土壤微生物群落等导致土壤碳储量的变化^[19]。不同土地利用类型表层与亚表层 SOCD 均表现为林地>灌丛>农田>草地。表层林地与灌丛 SOCD 间无显著差异（ $P>0.05$ ），其他土地利用类型间均差异显著（ $P<0.05$ ），亚表层不同土地利用类型 SOCD 均差异显著（表 2）。

表 2 南水北调水源地不同土地利用类型有机碳密度

Table 2 The SOCD in different land use types in the water source area of South-North Water Diversion Project

土地利用方式 land use type	面积/ $\times 10^4$ hm ² area	面积占比/% area percentage	有机碳密度变幅/ (kg·m ⁻³) SOCD variation range		有机碳密度/(kg·m ⁻³) SOCD		0~20cm 碳储量 /Pg carbon storage in 0~20cm	碳储量比例/ % carbon storage percentage
			0~20cm	$\geq 20\sim 40$ cm	0~20cm	$\geq 20\sim 40$ cm		
			林地 forest	736.691	77.38	1.33 ~ 17.07		
灌丛 bushwood	0.092	0.009	0.60 ~ 9.91	1.11 ~ 5.65	4.55 \pm 2.57 Aa	2.59 \pm 1.19 Bb	4.18 $\times 10^{-4}$	0.01
农田 cropland	179.030	18.81	0.75 ~ 6.71	0.37 ~ 6.11	2.75 \pm 1.09 Ab	2.00 \pm 0.93 Bc	0.49	12.02
草地 grassland	13.901	1.46	0.29 ~ 6.69	0.21 ~ 3.37	1.45 \pm 1.41 Ac	1.15 \pm 0.84 Bd	0.022	0.49

土地利用方式中林地的 SOCD 及分布面积最大，是区内碳储量贡献最大的土地利用类型。灌丛由于分布面积最小，碳储量占比最小。土地利用的变化将会影响土地利用方式的分布面积和 SOCD，进一步引起土壤碳储量的升高和降低，成为区域“碳源”和“碳汇”区。林地在区内分布较广且 SOCD 较大，被开垦利用的可能性较大，林地若受到人为破坏转变为农田，将由“碳汇”区向“碳源”区转变，因此林地和农田的分布和变化是控制和影响本研究区内土壤碳储量的主要土地利用类型（表 2）。在相同海拔梯度不同土地利用方式中，表层与亚表层 SOCD 大小表现为林地、灌丛>农田、草地（图 3）。

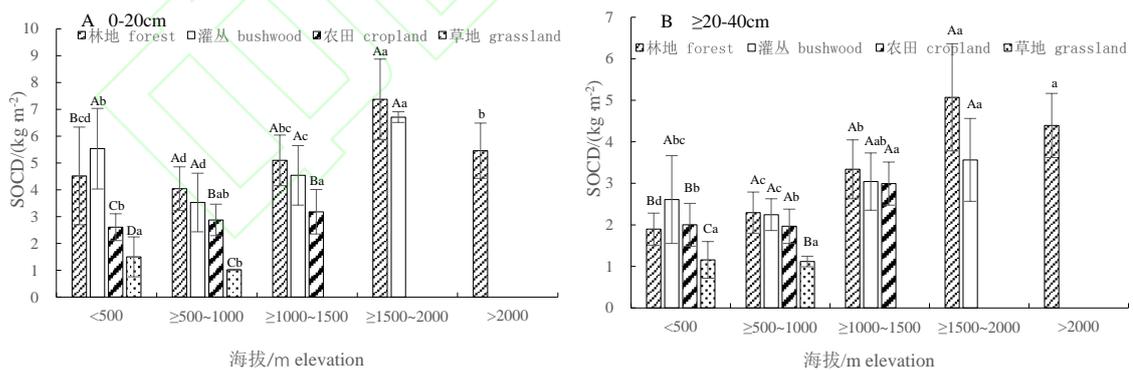


图 3 南水北调水源地不同海拔和土地利用类型 SOCD

Fig.3 The SOCD in different elevation gradient and land uses SOCD in different land use types in the water source area of South-North Water Diversion Project

不同海拔区域的气温、降水和植被类型等会存在一定差异，植被凋落物与微生物活性的不同会影响土壤有机碳的积累^[20]。从图 3 可以看出，在相同土地利用不同海拔梯度，表层与亚表层均表现为林地和灌丛 SOCD 在海拔 $\geq 1\ 500\sim 2\ 000$ m 最大，农田在海拔<1 500 m 范围内随海拔梯度的升高而增大，草地在海拔<1 000 m 的范围内随海拔梯度的升高而减小（图 4）。

2.4 不同森林类型的土壤有机碳分布分析

不同类型的森林因地表植被覆盖、凋落物的质和量、土壤微生物的分解作用及人为干扰等不同，影响 SOC 的输入和输出，从而影响 SOCD^[21]。从表 3 可以看出，3 种森林类型表层与亚表层 SOCD 由大到小的顺序为阔叶林>混交林>针叶林，阔叶林的 SOCD 显著大于针叶林的 ($P<0.05$)。表层与亚表层阔叶林 SOCD 比针叶林分别提高了 20.77%和 22.64%。但阔叶林与混交林、混交林与针叶林的 SOCD 差异不显著 ($P>0.05$)，不同森林类型表层与亚表层 SOCD 均差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 南水北调水源地不同森林类型有机碳密度

Table 3 SOCD in different forest types SOCD in different land use types in the water source area of South-North Water Diversion Project

森林类型 forest type	有机碳密度变幅/(kg·m ⁻²)		有机碳密度/(kg·m ⁻²)		变异系数/%	
	SOCD variation range		SOCD		coefficient of variation	
	0~20 cm	≥20~40 cm	0~20 cm	≥20~40 cm	0~20 cm	≥20~40 cm
阔叶林 broad-leaf forest	1.47 ~ 17.07	0.60 ~ 8.73	5.35±2.48 Aa	3.25±1.66 Ba	46.36	51.11
针叶林 coniferous forest	1.87 ~ 12.39	0.31 ~ 5.87	4.43±2.43 Ab	2.65±1.36 Bb	54.92	51.40
混交林 mixed forest	1.68 ~ 15.22	0.83 ~ 13.75	4.53±2.36 Aab	2.80±2.03 Bab	52.11	72.68

阔叶林和针叶林表层 SOCD 均在海拔 ≥1 500~2 000 m 范围最大，而混交林在海拔 ≥2 000 m 范围最大，亚表层阔叶林的 SOCD 在海拔 ≥1 500~2 000 m 范围最大，针叶林和混交林在海拔 ≥2 000 m 范围最大 (图 4)。

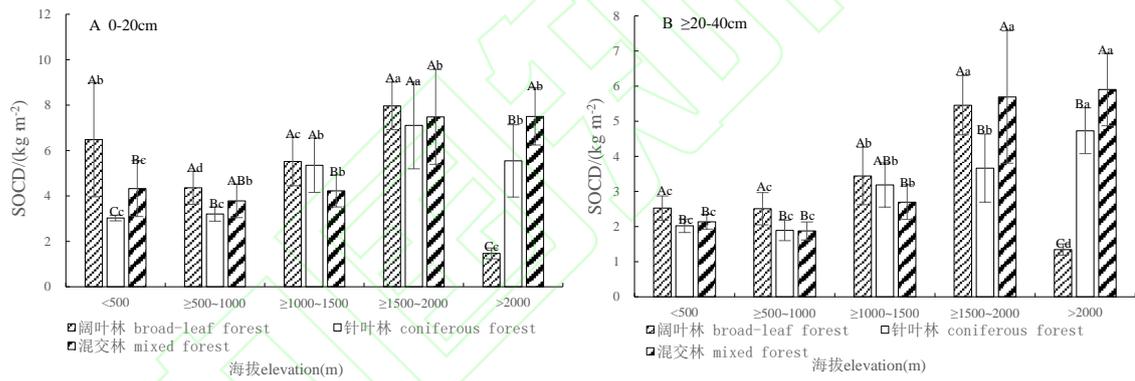


图 4 南水北调水源地不同海拔和森林类型有机碳密度

Fig.4 The SOCD in different elevation gradient and forest layers SOCD in different land use types in the water source area of South-North Water Diversion Project

2.5 影响土壤有机碳密度的驱动因子分析

土壤作为复杂的耦合系统，SOCD 的含量与分布受多种因素共同影响，交互作用是检验两因子交互是否会增加、减弱或相互独立的影响因变量。本研究中森林类型的分类较少，运用地理探测器分析的准确度低，海拔和土地利用等的改变必然会引起土壤的理化性质发生相应的改变，而这些因素对 SOCD 的影响不容忽视。故本研究采用地理探测器对海拔、土壤类型、不同土地利用及土壤性质 (黏粒、砂粒、容重、pH) 对 SOCD 空间分异影响进行交互分析。结果表明，海拔和土地利用对 SOCD 空间分异的解释力较大， q 值分别为 0.25 和 0.20，土壤性质的解释力为黏粒 (0.11) > pH (0.086) > 砂粒 (0.066) > 容重 (0.048)，土壤类型的解释力相对较小，为 0.07。不同因子在交互作用下的解释力均明显增强，海拔与土地利用交互影响最强 (0.35)，海拔与黏粒含量交互影响 (0.33) 次之 (表 4)。表明研究区 SOCD 受到多因素的共同制约，并非单一因子对 SOCD 空间分布起决定性作用。

表 4 南水北调水源地因子交互值及交互效应

Table 4 Interaction values and effect of SOCD influencing factors SOCD in different land use types in the water source area of South-North Water Diversion Project

交互因子 interaction factor	土地利用 land use	海拔 elevation	土壤类型 soil type	黏粒 clay	砂粒 sandy	容重 bulk density
海拔 elevation	0.35↑					
土壤类型 soil type	0.26↑	0.32↑↑				
黏粒 clay	0.30↑	0.33↑	0.23↑↑			
砂粒 sandy	0.29↑↑	0.32↑	0.18↑↑	0.15↑		
容重 bulk density	0.27↑↑	0.34↑↑	0.18↑↑	0.19↑↑	0.20↑↑	
pH	0.25↑	0.29↑	0.21↑↑	0.23↑↑	0.18↑↑	0.22↑↑

注：↑. 双因子增强 Double factor enhancement, ↑↑. 非线性增强 nonlinear enhancement.

3 讨论

随着土壤深度的增加土壤有机碳密度 (SOCD) 减小, 主要因为植物根系集中分布在土壤表层, 凋落物和腐殖质以及土壤微生物的分解对土壤有机碳的贡献主要作用于地表, 且随土壤深度的增加而减弱, 农田由于人为施肥使表层 SOCD 相对较高。研究区表层 SOCD 比全国平均水平高 56.55%, 这可能与南水北调中线工程水源地林地分布面积 (77.38%) 较大有关, 林地丰富的凋落物可使土壤有机碳长期保持在较高水平。山地土壤中, 不同土壤类型的形成主要是成土母质在不同海拔受不同水热条件和地表植被影响的结果。石灰 (岩) 土较高的 SOCD 可能与石灰岩发育的土壤含有较高比例的黏粒、水稳性团聚体数量和重量等特性有关, 暗棕壤及棕壤主要分布在较高海拔的林地, 高海拔区域温度低, 植被保存较为完好, 人为干扰小, 故其 SOCD 较高。水稻土属于水成土, 水分长期饱和使土壤处于嫌气还原状态, 有利于有机质的积累, 使水稻土 SOCD 相对较高。新积土可能因为成土时间短、生物活动性较低, 土壤有机质积累缓慢; 褐土主要分布在丹江流域西北部海拔 1,000 m 左右的油松 (*Pinus tabuliformis* Carr.) 林内, 油松针叶林凋落物中木质素、树脂含量较高, 分解速率较慢; 黄褐土是研究区内除棕壤和黄棕壤外分布面积相对较大的土壤类型, 因其质地黏重, 渗透性差, 遇降水易形成地面径流等使土壤贫瘠, 因此研究区内新积土、黄褐土和褐土表层土壤 SOCD 低于其平均值 4.18 kg/m²。

水源地的林地土壤类型主要是黄棕壤和棕壤, 灌丛和草地土壤类型主要是黄棕壤, 农田的主要土壤类型是黄棕壤和水稻土。落叶阔叶林的主要植被类型是栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 林和锥栗 (*Castanea henryi*) 林, 针阔叶混交林的主要植被类型是马尾松 (*Pinus massoniana*) 栓皮栎混交林、油松 (*Pinus tabuliformis*) 栓皮栎混交林, 针叶林的主要植被类型是马尾松林、油松林。林地转变为农田后, 植被枯落物和根系死亡周转输入到土壤中的碳减少, 同时山区的坡耕地由于地表覆盖降低, 加剧了土壤侵蚀, 造成土壤碳的流失, 尤其是表层土壤^[22]。翻耕管理导致团聚体对土壤有机碳的保护作用遭到破坏, 使原来受团聚体保护的土壤有机质暴露在微生物和酶的作用下, 导致矿化速率增加。凋落物是林地土壤有机碳的主要来源, 凋落物分解的快慢及其养分释放的多少, 决定了土壤中有效养分的供应状况, 较低的 C/N 促进凋落物的分解^[23], 阔叶林凋落物中的 C/N 小于针叶林的, 针叶林凋落物分解后形成的酸性环境抑制了微生物的活动等, 使土壤 SOCD 表现为阔叶林 > 混交林 > 针叶林的主要原因。在林地经营过程中, 可补种阔叶林来提高林地土壤有机碳密度^[24]。

海拔通过改变温度和降水, 使土壤微气候、植被、土壤类型、土地利用等发生相应的改变, 进而影响 SOCD 沿海拔梯度的分布^[25]。南水北调中线工程水源地 SOCD 在海拔 1,500~2,000 m 达到峰值, 当海拔 > 2,000 m, SOCD 下降, 这与李龙等^[26]的研究结果一致。低海拔区域, 温度相对较高, 降水较少, 有机质分解快, 且人口密度大及人为干扰强, 导致 SOCD 较低。随海拔升高, 温度降低, 微生物活动降低, 利于有机碳积累, 同时人口密度减小和人为干扰降低, 植被质量提高, 故 SOCD 随海拔升高而增大。当海拔升至一定高度时, 温度进一步下降使植被生长期缩短, 林分类型发生相应变化, 同时林分郁闭度和质量下降, 使 SOCD 下降。

参考文献 (reference) :

- [1] SANTINI N S, ADAME M F, NOLAN R H, et al. Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests[J]. For Ecol Manag, 2019, 446: 115-125. DOI:10.1016/j.foreco.2019.05.029.
- [2] LAL R, SMITH P, JUNGKUNST H F, et al. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems[J]. J Soil Water Conserv, 2018, 73(6): 145A-152A. DOI:10.2489/jswc.73.6.145a.

- [3] ZIMMERMANN M, LEIFELD J, CONEN F, et al. Can composition and physical protection of soil organic matter explain soil respiration temperature sensitivity?[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 107(1/2/3): 423-436. DOI:10.1007/s10533-010-9562-y.
- [4] DJUKIC I, ZEHETNER F, TATZBER M, et al. Soil organic-matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2010, 173(1): 30-38. DOI:10.1002/jpln.200900027.
- [5] 卫玮, 党坤良. 秦岭南坡林地土壤有机碳密度空间分异特征[J]. *林业科学*, 2019, 55(5): 11-19. WEI W, DANG K L. Spatial variation of the density of soil organic carbon in forest land on the southern slope of Qinling mountains[J]. *Sci Silvae Sin*, 2019, 55(5): 11-19. DOI:10.11707/j.1001-7488.20190502.
- [6] 吴小刚, 王文平, 李斌, 等. 中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化[J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1539-1547. WU X G, WANG W P, LI B, et al. Altitudinal gradient of soil organic carbon in forest soils in the mid-subtropical zone of China[J]. *Acta Pedol Sin*, 2020, 57(6): 1539-1547. DOI:10.11766/trxb201909300184.
- [7] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响[J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1123-1131. YANG Y S, XIE J S, SHENG H, et al. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of Southern China[J]. *Acta Geogr Sin*, 2007, 62(11): 1123-1131. DOI:10.3321/j.issn:0375-5444.2007.11.001
- [8] 梁晨, 安菁, 范雅倩, 等. 北京松山国家级自然保护区典型植被类型表层土壤碳密度及周转速率特征[J]. *地球与环境*, 2020, 48(6): 672-679. LIANG C, AN J, FAN Y Q, et al. Surface soil carbon density and turnover rate of typical vegetation types in Beijing Songshan national nature reserve[J]. *Earth Environ*, 2020, 48(6): 672-679. DOI:10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.086.
- [9] WANG L, CHEN W, HUANG G, et al. Changes of the transitional climate zone in East Asia: Past and future[J]. *Clim Dyn*, 2017, 49(4): 1463-1477. DOI:10.1007/s00382-016-3400-4.
- [10] 周健民, 沈仁芳. *土壤学大辞典*[Z]. 北京: 科学出版社, 2013. ZHOU J M, SHEN R F. *Dictionary of soil science*[Z]. Beijing: Science Press, 2013.
- [11] 张甘霖, 龚子同. *土壤调查实验室分析方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2012. ZHANG G L, GONG Z T. *Soil survey laboratory methods*[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [12] RUBIN D B. Multiple imputation after 18+ years[J]. *J Am Stat Assoc*, 1996, 91(434): 473-489. DOI:10.1080/01621459.1996.10476908.
- [13] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geogr Sin*, 2017, 72(1): 116-134. DOI:10.11821/dlxb201701010.
- [14] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 629-639. ZHANG Y J, YU Y C, NIU J J, et al. The elevational patterns of soil organic carbon storage on the northern slope of Taibai Mountain of Qinling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 629-639. DOI:10.5846/stxb201808031659.
- [15] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699. XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China[J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, 41(5): 687-699. DOI: 10.11766/trxb200312090505
- [16] 薄会娟, 董晓华, 郭梁锋, 等. 湖北省土壤有机碳垂直分布及储量估算[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(12): 290-296. BO H J, DONG X H, GUO L F, et al. Vertical distribution and storage estimation of soil organic carbon in Hubei Province[J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 41(12): 290-296. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.12.042.
- [17] 宋满珍, 刘琪璟, 吴自荣, 等. 江西省森林土壤有机碳储量研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(2): 6-10. SONG M Z, LIU Q J, WU Z R, et al. Organic carbon storage of forest soil in Jiangxi Province[J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2010, 34(2): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1,000-2006.2010.02.002.
- [18] GHOSH A, BHATTACHARYYA R, MEENA M C, et al. Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an inceptisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 134-144. DOI:10.1016/j.still.2017.12.006.
- [19] HOYLE F C, D'ANTUONO M, OVERHOU T, et al. Capacity for increasing soil organic carbon stocks in dryland agricultural systems [J]. *Soil Research*, 2013, 51(7-8): 657-667. DOI:10.1071/SR12373.

- [20] 秦海龙, 贾重建, 卢瑛, 等. 广东罗浮山土壤有机碳储量与组分垂直分布特征[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(3): 108-115. QIN H L, JIA C J, LU Y, et al. The vertical distribution characteristics of soil organic carbon stocks and fractions in luofu mountain of Guangdong[J]. J Southwest For Univ (Nat Sci), 2018, 38(3): 108-115. DOI:10.11929/j.issn.2095-1914.2018.03.016.
- [21] 丁访军, 高艳平, 周凤娇, 等. 贵州西部 4 种林型土壤有机碳及其剖面分布特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 38-43. DING F J, GAO Y P, ZHOU F J, et al. Soil organic carbon and its distribution characteristics in the soil profile for four forest types in west Guizhou[J]. Ecol Environ Sci, 2012, 21(1): 38-43. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.01.014.
- [22] 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 Tillage Res, 2017, 166: 1-9. DOI:10.1016/j.still.2016.10.004.
- [23] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77-83. LI Z A, ZOU B, DING Y Z, et al. Key factors of forest litter decomposition and research progress[J]. Chin J Ecol, 2004, 23(6): 77-83. DOI:10.13292/j.1,000-4890.2004.0204.
- [24] 肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志. 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 105-111. XIAO X, WANG X T, OUYANG X Z. The characteristic of soil organic carbon and relationship with litter quality in *Pinus massoniana* plantation[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2015, 39(6): 105-111. DOI:10.3969/j.issn.1,000-2006.2015.06.019.
- [25] DING J, LI F, YANG G, et al. The permafrost carbon inventory on the Tibetan Plateau: A new evaluation using deep sediment cores[J]. Glob Chang Biol, 2016, 22(8): 2688-2701. DOI:10.1111/gcb.13257.
- [26] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 赤峰市小流域地形因子对土壤有机碳密度的影响[J]. 中国水土保持, 2014(3): 43-46. LI L, YAO Y F, QIN F C, et al. Effects of topographic factors on soil organic carbon density in small watershed of Chifeng City[J]. Soil Water Conserv China, 2014(3): 43-46. DOI:10.14123/j.cnki.swcc.2014.03.016.