

六道沟小流域地形序列土壤碳剖面分布特征及影响因素

毛娜^{1,2}, 邵明安^{1,2,3,4}, 黄来明^{3,4}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所,

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所,

中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 为了更好地理解黄土高原植被恢复与生态重建过程对土壤碳循环过程的影响, 研究选取位于黄土高原六道沟小流域的典型土壤地形序列(东北坡 NE 序列, 西坡 W 序列), 分析了不同坡向间及同一坡向内随植被类型变化土壤有机碳和无机碳的剖面分布特征及其影响因素。结果表明: 六道沟小流域地形序列土壤有机碳含量在 0—50 cm 土层内随土层深度增加而显著降低, 50 cm 土层以下基本趋于稳定, 且剖面上层(0—50 cm)有机碳含量显著高于剖面下层(50—200 cm, $p < 0.05$), 但在同一深度土层(0—50, 50—200, 0—200 cm)不同坡向林地和草地土壤有机碳平均含量均没有显著差异($p > 0.05$)。与有机碳相比, 无机碳含量相对较高并且主要在剖面下部(50 cm 以下)不同深度土层富集。NE 序列林地和草地剖面无机碳平均含量接近($p > 0.05$), 而 W 序列林地剖面无机碳平均含量显著高于草地($p < 0.05$); 不同坡向草地剖面无机碳平均含量无显著差异($p > 0.05$), 但不同坡向林地剖面无机碳平均含量表现为 W 序列显著高于 NE 序列($p < 0.05$)。0—50 cm 土层有机碳含量与 pH、容重和土壤含水量均呈极显著负相关关系, 而与土壤总孔隙度呈极显著正相关关系; 50—150 cm 土层无机碳含量与 pH 和土壤总孔隙度均呈极显著负相关关系, 而与容重、黏粒含量和土壤含水量均呈极显著正相关关系。NE 序列和 W 序列 2 m 土体总碳密度相当, 分别为 15.2~47.4 kg/m² 和 18.3~51.3 kg/m², 其中无机碳密度占 78%~94%, 1—2 m 土层总碳密度占 2 m 土体总碳密度的 35%~74%。若只考虑土壤有机碳库或只考虑浅层 1 m 土壤碳库, 六道沟小流域 2 m 土体总碳储量平均将被低估 88% 和 51%。

关键词: 六道沟小流域; 地形序列; 有机碳; 无机碳; 碳密度; 剖面分布

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0222-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.05.035

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Carbon Profile Along Toposequences in Liudaogou Watershed

MAO Na^{1,2}, SHAO Ming'an^{1,2,3,4}, HUANG Laiming^{3,4}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil

and Water Cornersation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation

and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100101; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to understand the effects of vegetation restoration and ecological restoration process on soil carbon cycling, the profile distribution of soil organic and inorganic carbon under different slopes and vegetation types along two toposequences of Liudaogou watershed on the Loess Plateau (China) were investigated, and the profile distribution characteristics and the influencing factors of soil organic carbon and inorganic carbon among different slopes and among different vegetation types on the same slope were analyzed. The typical toposequences were located in the northeast slope (NE sequence) and west slope (W sequence) of the Liudaogou watershed, respectively. The results showed that soil organic carbon content decreased significantly with increasing of soil depth within 0—50 cm soil layer, and then remained relatively constant in the soil layer deeper than 50

收稿日期: 2017-04-18

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41601221); 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0501605); 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1602)

第一作者: 毛娜(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤物理研究。E-mail: maona0110@163.com

通信作者: 邵明安(1956—), 男, 研究员, 主要从事土壤物理研究。E-mail: shaoma@igsnr.ac.cn

黄来明(1984—), 男, 博士, 主要从事土壤地理研究。E-mail: huanglm@igsnr.ac.cn

cm, and the organic carbon content of the 0–50 cm soil layer was significantly higher than those of the 50–200 cm soil layers ($p < 0.05$). However, in the same soil depth (0–50, 50–200 or 0–200 cm), there was no significant difference on the mean organic carbon content under either forestlands or grasslands among different slopes ($p < 0.05$). Compared with organic carbon, soil inorganic carbon content was relatively high, and mainly enriched in the different soil layers deeper than 50 cm. In the NE sequence, the mean inorganic carbon contents were comparable in the forestland and the grassland ($p > 0.05$). In contrast, in the W sequence the mean inorganic carbon content of the forestland was significantly higher than that of the grassland ($p < 0.05$); there was no significant difference on the mean inorganic carbon content of the grasslands among different slopes ($p > 0.05$), while the mean inorganic carbon content of the forestland in the W sequence was higher than that in the NE sequence ($p < 0.05$). Organic carbon content in the 0–50 cm soil layer was significantly negatively correlated with pH, bulk density and soil water content, but was significantly positively correlated with soil total porosity; inorganic carbon content in the 50–150 cm soil layer was significantly negatively correlated with pH and total soil porosity, but was significantly positively correlated with bulk density, clay content and soil water content. Soil carbon densities within 0–2 m profile were $15.2 \sim 47.4 \text{ kg/m}^2$ and $18.3 \sim 51.3 \text{ kg/m}^2$ in the NE sequence and W sequence, respectively, in which inorganic carbon density accounted for 78%~94%. Total carbon density of 1–2 m soil layer were 35%~74% of the total carbon density of 0–2 m soil profile. Our study indicated that neglecting inorganic carbon or neglecting deep soil carbon (1–2 m) would lead to underestimation of soil carbon stock by 88% and 51%, respectively.

Keywords: Liudaogou watershed; toposequences; organic carbon; inorganic carbon; carbon density; profile distribution

土壤碳库包括有机碳库和无机碳库两部分,是陆地生态系统中最大且周转时间最长的碳库。研究表明,全球1 m土体中碳储量约为2 500 Pg(1 Pg=10¹⁵ g),其中有机碳约为1 550 Pg^[1],无机碳约为950 Pg^[2]。土壤中有有机碳的封存、分解与释放对全球碳循环和气候变化具有重要影响^[3],因此,许多学者研究了不同空间尺度下(如从全球^[1]、区域^[4]和流域^[5]到土链^[6]、田块^[7]和颗粒^[8])土壤有机碳的分布特征及其在自然与人为作用下的演变规律^[9-11]。与土壤有机碳研究相比,土壤无机碳研究相对较少,但近年来有逐渐增加的趋势。研究表明,我国1 m土体中无机碳储量约为53.3~77.9 Pg^[12-14],主要分布在西北干旱与半干旱地区,并且受区域气候条件、植被类型和土地利用方式等因素的影响^[13-14]。因此,单一研究土壤有机碳或无机碳将会低估陆地生态系统的固碳潜力和碳汇功能。最近一些学者同时研究了土壤有机碳和无机碳的分布特征及其影响因素^[6,15],为深入理解区域土壤碳循环过程和精确预测陆地碳库奠定了基础。

黄土高原位于我国西北干旱与半干旱地区,具有深厚的黄土覆盖和复杂的地形地貌特征^[16],其碳储量的空间分布(包括垂直方向^[17]和水平方向^[18])以及土壤碳在不同组分间的分配^[19]近年来成为该地区的研究热点之一。研究表明,黄土高原1 m土体中无机碳储量(10.2 Pg)约为有机碳储量的2.1倍^[18],植

被类型显著影响黄土高原区域或流域尺度土壤有机碳和无机碳的剖面分布特征^[18-20]。退耕还林草工程实施以来,黄土高原地区土地利用格局和植被盖度发生了明显变化,植被恢复与生态重建过程中固碳效益演变规律及其机制近年来受到学者们的广泛关注^[21-23]。Liu等^[22]研究了黄土高原王东沟小流域内不同年限草地土壤碳的变化特征,结果表明土壤有机碳的积累速率高于无机碳的淋失速率(0.75 Mg/(hm²·a)),1 m土体中总碳储量随着退耕年限的增加而增加,退耕后土壤碳汇功能有所提升。以往的研究在区域或流域尺度上揭示了黄土高原土壤碳储量空间分布特征及其演变规律,并且研究主要集中于表层土壤(0–20 cm)或者1 m深度的土壤有机碳,然而在较小尺度下(如坡面尺度)以及1 m以下或者更深层次土壤的有机碳以及无机碳的剖面分布特征及其影响因素研究较少。由于受海拔高度、地形、水汽输送条件等因素的影响,黄土高原阴、阳坡成土微气候环境(水热条件)和植被类型具有明显差异,这些因素如何影响坡面尺度下碳循环以及土壤碳库的组成与分布目前尚不清楚。基于此,本研究选取黄土高原六道沟小流域的典型土壤地形序列,分析了不同坡向间及同一坡向内随植被类型变化土壤有机碳和无机碳的剖面分布特征及其影响因素,探讨了坡向和植被类型差异对剖面土壤碳分布的影响,以期对黄土高原植被合理配置和提升土壤碳汇功能提供科学依据。

1 材料与方

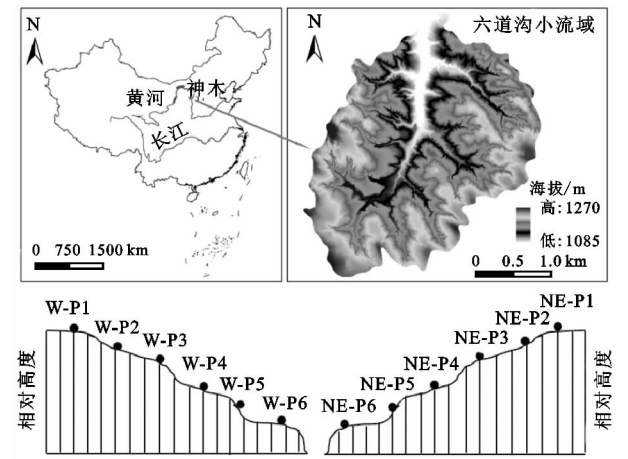
1.1 研究区概

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,试验站位于陕西省神木县六道沟小流域(110°21′—110°23′ E, 38°46′—38°51′ N),海拔 1 094~1 273 m。六道沟小流域位于毛乌素沙漠边缘地带,属于典型的盖沙黄土丘陵地貌,是晋陕蒙水蚀风蚀交错带强烈侵蚀中心。该流域面积为 6.9 km²,成土母质为黄土,气候类型为半干旱大陆性季风气候。年均气温 8.4℃,多年平均降水量为 437 mm,年际变化较大,其中 6—9 月的降水占全年降水量的 77%,且多以暴雨形式出现。流域内大部分天然植被已经被人为破坏,为了防止土壤侵蚀和生态环境的进一步恶化,该区域开展了退耕还林草措施,不同坡向间以及同一坡向内不同海拔高度植被类型不同,主要包括杏树、沙柳、苜蓿、柠条、长芒草等。

1.2 样品采集与分析

2016 年 4 月,考察了神木六道沟小流域的地形、地貌和植被类型,选取了东北朝向和西朝向的样地,综合考虑海拔、植被类型等因素,在样地中分别选取了 6 个代表性土壤剖面组成地形序列(P1~P6,图 1)。不同坡向地形序列土壤植被类型均随海拔高度变化而变化(表 1)。土地利用类型包括草地和林地,草本植物类型主要有苜蓿、长芒草、草木樨、达乌里胡枝子、铁杆蒿、冰草等,林地主要植物类型为杏树和柠

条(表 1)。土壤剖面深度为 2 m,分别采集剖面不同土层原状土壤和扰动土壤样品,其中 0—1 m 土层采样间隔为 10 cm,1—2 m 土层采样间隔 20 cm。将原状土放置于烘箱中,105℃下烘干至恒重,测得土壤容重和质量含水量。扰动土壤样品带回实验室自然风干,挑去枯枝落叶、根系和砾石,磨碎后分别过 10, 60,100 目筛备用。土壤颗粒组成采用 MS 2000 激光粒度仪测定;pH 采用浸提电位法测定(水土质量比 2.5:1);有机碳用 H₂SO₄—K₂Cr₂O₇ 外加热法测定;碳酸钙用气量法测定,上述基本理化性质测定方法参照《土壤农化分析》^[24]。



注:NE 序列为东北朝向,W 序列为西朝向;P1~P6 为不同海拔高度土壤剖面。

图 1 研究区位置及剖面样点分布示意

表 1 六道沟小流域不同坡向土壤地形序列概况

剖面	海拔/ m	土地 利用	典型 植被	植被 覆盖度/%	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	粉粒/ %	总孔隙度/ %	土壤含水量/ (g·kg ⁻¹)
NE—P1	1244	草地	长芒草	80	8.7~8.9	1.3~1.6	39.9~66.6	41.7~48.4	57.8~121.3
NE—P2	1235	林地	杏树	60	8.7~8.9	1.4~1.8	39.3~65.8	36.7~49.7	18.9~137.6
NE—P3	1230	草地	长芒草	90	8.7~8.8	1.3~1.6	32.7~60.3	42.6~54.0	66.3~168.9
NE—P4	1216	林地	杏树	50	8.4~8.9	1.2~1.6	52.6~64.0	39.9~56.0	61.8~146.8
NE—P5	1201	草地	冰草	50	8.8~9.1	1.4~1.6	24.9~43.5	44.4~52.3	30.7~131.4
NE—P6	1203	林地	柠条	80	8.7~9.1	1.4~1.5	25.0~46.5	44.2~51.6	61.2~88.2
W—P1	1203	草地	草木樨	80	8.6~9.0	1.4~1.6	52.4~70.2	43.3~50.0	59.8~129.1
W—P2	1214	林地	杏树	50	8.8~9.0	1.2~1.7	52.2~67.1	37.4~51.9	41.1~143.0
W—P3	1210	草地	长芒草	80	8.7~8.9	1.4~1.6	48.2~70.3	30.7~53.0	22.5~114.9
W—P4	1202	林地	杏树	70	8.7~8.9	1.2~1.8	50.1~62.7	36.1~52.3	52.1~104.5
W—P5	1193	林地	杏树	90	8.9~9.0	1.4~1.6	53.2~66.7	45.0~54.9	49.7~109.4
W—P6	1182	草地	长芒草	90	8.7~9.2	1.4~1.6	47.5~66.0	43.0~50.4	43.9~143.6

1.3 数据处

某一土层 i 的土壤有机碳密度 SOC_i (kg/m²) 的计算公式为:

$$SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中: C_i 为土壤有机碳含量(g/kg); D_i 为土壤容重(g/cm³); E_i 为土层厚度(cm); G_i 为砾石占土层的体积百分比(%)。

如果 2 m 土体的剖面由 n 层组成,那么 2 m 土体

有机碳密度(SOC_t , kg/m²)的计算公式为:

$$SOC_t = \sum_{i=1}^n C_i D_i E_i (1 - G_i) / 100 \quad (2)$$

土层无机碳密度 SIC_i 和 2 m 土体无机碳密度分别参照公式(1)和(2)计算,其中 C_i 为土壤无机碳含量(g/kg)。2 m 土体总碳密度(SC_t , kg/m²)的计算公式为:

$$SC_t = SOC_t + SIC_t \quad (3)$$

采用 SPSS 18.0 统计软件进行数据分析,采用

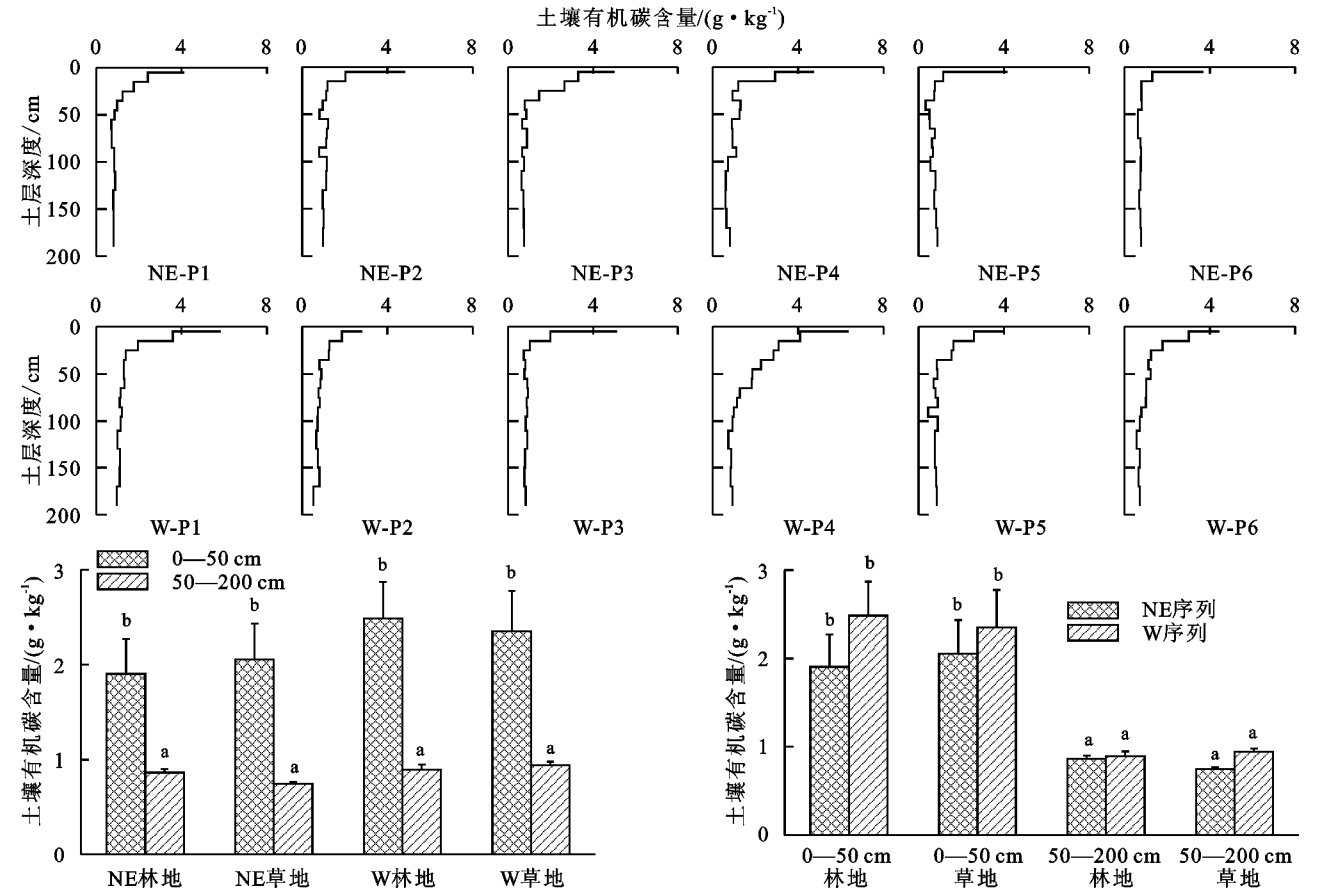
Origin Pro 8.5.1 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同坡向地形序列土壤有机碳和无机碳含量剖面分布特征

不同坡向地形序列土壤有机碳含量在 0—50 cm 土层内均随土层深度增加而显著降低,50 cm 土层以下基本趋于稳定(图 2)。总体来看,NE 序列和 W 序列林地土壤有机碳含量(0.8~4.4,0.7~4.4 g/kg)和草地(0.6~4.4,0.8~5.1 g/kg)相近。NE 序列和 W 序列 0—50 cm 土层有机碳平均含量(1.4~2.6,1.6~3.7 g/kg)分别为 50—200 cm 土层有机碳平均含量(0.7~1.0,0.8~1.1 g/kg)的 2~4 倍和 2~3

倍,剖面上层土壤有机碳含量较高主要归因于地表枯落物、根系分泌物和微生物生物量的输入^[17]。同一坡向内林地和草地剖面上层(0—50 cm)有机碳含量均显著高于剖面下层(50—200 cm)($p<0.05$)(图 2),但在同一深度土层(0—50,50—200 cm)不同坡向林地和草地土壤有机碳含量均没有显著差异($p>0.05$)(图 2)。六道沟小流域不同坡向地形序列土壤有机碳平均含量(0.9~2.0 g/kg)与纸坊沟小流域土壤有机碳含量(1.9~6.7 g/kg)^[20]接近,但显著低于青藏高原高寒草甸土壤有机碳含量(5.0~127.4 g/kg)^[6]。不同地区土壤有机碳含量的差异主要与气候条件、植被类型和土壤水分状况等因素有关^[25]。



注:NE 序列为东北朝向;W 序列为西朝向;不同小写字母表示同一坡向内林地或草地不同土层间土壤有机碳含量具有显著差异($p<0.05$)或不同坡向相同植被同一土层深度土壤有机碳含量具有显著差异($p<0.05$)。

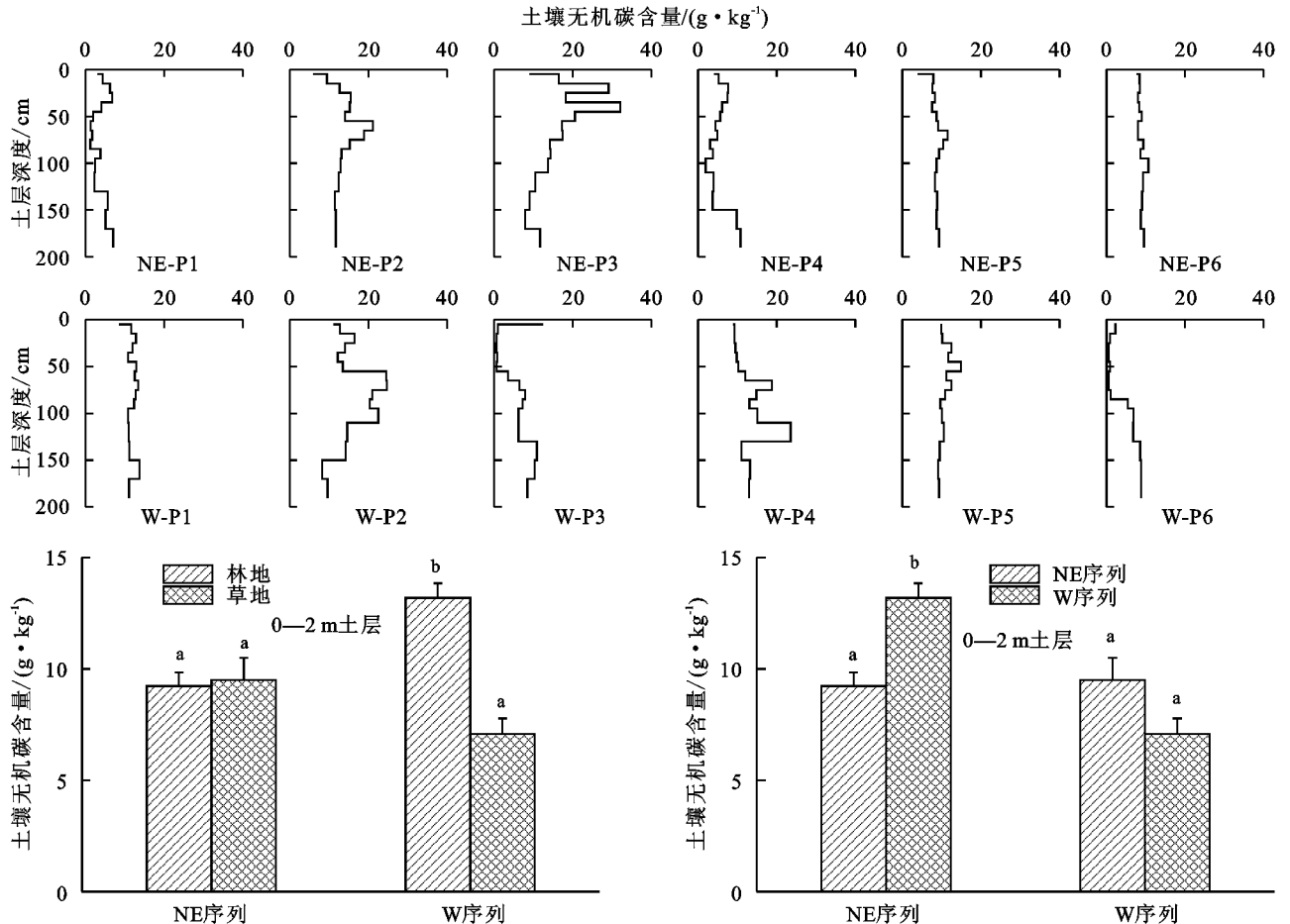
图 2 六道沟小流域不同坡向地形序列土壤有机碳含量剖面分布特征

与有机碳相比,不同坡向地形序列土壤无机碳含量相对较高且剖面分布差异较大(图 2,图 3)。不同剖面土壤无机碳含量的最大值分布在 50—100 cm (NE—P2, NE—P3, NE—P5, W—P2, W—P5), 100—150 cm (NE—P6, W—P3, W—P4) 和 150 cm 以下 (NE—P1, NE—P4, W—P1, W—P6) 3 个层次(图 3),表明无机碳在剖面下部(50—200 cm)不同深度富集,这与有机碳在剖面上部(0—50 cm)富集趋势相反(图 2)。NE 序列和 W 序列土壤无机碳含量最

大值(7.0~32.0,8.9~24.7 g/kg)分别为无机碳含量最小值(1.2~7.9,0.6~9.1g/kg)的 1~6 倍和 2~21倍。研究表明,黄土中碳酸钙等组分在降雨的作用下会随根孔或动物孔隙发生淋溶和淀积,从而在土壤剖面中发生分异^[16]。同一坡向内 NE 序列林地和草地无机碳剖面平均含量接近($p>0.05$),而 W 序列林地无机碳剖面平均含量显著高于草地($p<0.05$)(图 3);不同坡向草地剖面无机碳平均含量无显著差异($p>0.05$),而不同坡向林地剖面无机碳平

均含量表现为 W 序列显著高于 NE 序列 ($p < 0.05$) (图 3)。由此说明,不同坡向和植被影响无机碳剖面含量分布。但是,土壤中的无机碳酸盐主要来自于成土母质—黄土,土壤无机碳由剖面上部向下部淋洗并在下部淀积,外部环境不同,如不同坡向和植被,导致其淋洗速率和程度不同,故在一定深度内

的土壤无机碳含量具有差异。六道沟小流域不同坡向地形序列土壤无机碳平均含量 ($3.7 \sim 16.2 \text{ g/kg}$) 与纸坊沟小流域 ($12.9 \sim 16.5 \text{ g/kg}$)^[21] 以及青藏高原高寒草甸 ($2 \sim 15.0 \text{ g/kg}$)^[6] 土壤无机碳含量接近,这是因为黄土的组分均一并且碳酸钙含量变化幅度较小^[17]。



注:不同小写字母表示林地和草地 0—2 m 土壤无机碳平均含量具有显著差异 ($p < 0.05$) 或不同坡向林地和草地 0—2 m 土壤无机碳平均含量具有显著差异 ($p < 0.05$)。

图 3 六道沟小流域不同坡向地形序列土壤无机碳含量剖面分布特征

2.2 不同坡向地形序列土壤有机碳、无机碳和总碳密度垂直分布特征

NE 序列和 W 序列 0—50 cm 土层有机碳密度分别为 $1.0 \sim 1.8, 1.1 \sim 2.5 \text{ kg/m}^2$ (表 2), 占 2 m 土体有机碳密度的 38%~53% 和 39%~50% (图 4), 进一步证实了不同坡向土壤有机碳均在剖面上部富集。50 cm 以下土层 NE 序列和 W 序列有机碳密度差异较小, 分别为 $0.5 \sim 0.8 \text{ kg/m}^2$ 和 $0.6 \sim 1.1 \text{ kg/m}^2$ (50—100 cm), $0.5 \sim 0.8 \text{ kg/m}^2$ 和 $0.5 \sim 0.8 \text{ kg/m}^2$ (100—150 cm), $0.5 \sim 0.7 \text{ kg/m}^2$ 和 $0.5 \sim 0.8 \text{ kg/m}^2$ (150—200 cm) (表 2)。同一坡向内林地和草地剖面上层 (0—50 cm) 有机碳密度均显著高于剖面下层 (50—100, 100—150, 150—200 cm) ($p < 0.05$), 但在同一深度土层 (0—50, 50—100, 100—150, 150—200 cm) 不同坡向林地和草地土壤有机碳密度均没有显著差异 ($p > 0.05$)。六道沟小流域不同坡向林

地和草地 2 m 土体有机碳密度 ($2.6 \sim 4.8 \text{ kg/m}^2$) 均显著低于典型黄土区农地 2 m 土体有机碳密度 (10 kg/m^2)^[18], 这主要是由于人为施肥增加了农田土壤有机碳含量。NE 序列和 W 序列不同深度土层无机碳密度分别为 $3.6 \sim 15.5 \text{ kg/m}^2$ 和 $1.0 \sim 9.8 \text{ kg/m}^2$ (0—50 cm), $1.6 \sim 12.9 \text{ kg/m}^2$ 和 $1.3 \sim 16.7 \text{ kg/m}^2$ (50—100 cm), $2.3 \sim 9.2 \text{ kg/m}^2$ 和 $5.6 \sim 14.0 \text{ kg/m}^2$ (100—150 cm), $4.4 \sim 8.8 \text{ kg/m}^2$ 和 $6.9 \sim 9.8 \text{ kg/m}^2$ (150—200 cm) (表 2)。除 W—P6 剖面 0—50 cm 土层无机碳密度 (1.0 kg/m^2) 低于有机碳密度 (1.6 kg/m^2) 外, 其他剖面同一深度土层无机碳密度均高于有机碳密度 (表 2)。同一坡向内林地和草地以及不同坡向间同一利用类型下 (林地或草地) 100 cm 以下土层 (100—150, 150—200 cm) 无机碳密度均无显著差异 ($p > 0.05$), 表明不同坡向和植被类型对 100 cm 以下土壤无机碳密度没有显著影响。对于 1

m 以内土层,NE 序列林地和草地无机碳密度无显著差异,W 序列 50—100 cm 土层林地无机碳密度高于草地 ($p<0.05$);不同坡向草地 0—50 cm 土层无机碳密度表现为 NE 序列高于 W 序列 ($p<0.05$),林地 50—100 cm 土层无机碳密度表现为 NE 序列低于 W 序列 ($p<0.05$),这可能与不同坡向和植被类型下根系分布深度有关。长芒草、冰草等草本植物根系比较细小,侧根发达,主要呈水平分布,且大量分布在 0—60 cm 深度(占 85%以上)^[26];而柠条以及山杏等灌木和乔木主根明显,侧根、须根少,呈垂直分布,且根系可以延伸到深层土壤^[27-28],土壤碳酸盐会随着土壤孔隙向下运移。此外,坡向还会直接或间接地影响水热平衡,改变坡地微气候,改变植被地上和地下生物量^[29],从而影响无机碳的垂直分布。研究表明,六道沟小流域不同坡向林地和草地土壤 2 m 土体无机碳密度(11.8~48.4 kg/m²)显著高于黄土高原不同类型土壤 1 m 土体无机碳密度(0.1~24.1 kg/m²),表明深层土壤无机碳对黄土无机碳库的贡献不容忽视。

NE 序列和 W 序列不同深度土层总碳密度分别占 0—2 m 土层总碳密度的 21%~37%和 14%~26%(0—50 cm),14%~31%和 11%~34%(50—100 cm),14%~27%和 23%~34%(100—150 cm),16%~36%和 16%~41%(150—200 cm)(表 2),各

剖面 1—2 m 土层总碳密度约为 0—2 m 土层总碳密度的 35%~74%。除 W—P6 剖面 0—50 cm 土层碳库组成以有机碳为主(63%),NE 序列和 W 序列不同深度土层碳库组成均以无机碳为主(62%~96%)。NE 序列和 W 序列 0—2 m 土层总碳密度相当,分别为 15.2~47.4 kg/m²和 18.3~51.3 kg/m²,其中无机碳密度占 78%~94%。上述结果表明,若只考虑土壤有机碳库或只考虑浅层 1 m 土壤碳库,六道沟小流域 2 m 土体中碳库总储量平均将被低估 88%和 51%。Zhang 等^[17]研究了西北干旱地区 33 个典型黄土剖面土壤有机碳和无机碳的分布特征,结果表明 1—2 m 土层有机碳储量和无机碳储量分别占 0—2 m 土层有机碳储量和无机碳储量的 40%和 50%,2 m 土体中无机碳储量(40 kg/m²)约为有机碳储量(10 kg/m²)的 4 倍。Zhang 等^[17]研究进一步揭示了若只考虑土壤有机碳库(碳库总储量将被低估 80%)或只考虑浅层 1 m 土壤碳库(碳库总储量将被低估 50%)将大大低估黄土剖面 0—2 m 土层碳库总量。由于黄土高原具有深厚的黄土层,并且黄土剖面下部无机碳含量远高于有机碳含量^[17],未来的研究应充分考虑黄土厚度、不同深度土层有机碳库和无机碳库对土壤碳库总量的影响,从而为更准确地评估黄土高原固碳潜力提供科学依据。

表 2 六道沟小流域不同坡向地形序列 2 m 土体有机碳、无机碳和总碳密度 单位:kg/m²

剖面	0—50 cm 土层			50—100 cm 土层		
	SOCt	SICt	SCt	SOCt	SICt	SCt
NE—P1	1.5 (30)	3.6 (70)	5.1 (34)	0.6 (28)	1.6 (72)	2.2 (14)
NE—P2	1.5 (14)	8.9 (86)	10.4 (24)	0.8 (6)	12.9 (94)	13.6 (31)
NE—P3	1.8 (11)	15.5 (89)	17.3 (37)	0.6 (4)	12.7 (96)	13.3 (28)
NE—P4	1.5 (26)	4.2 (74)	5.7 (28)	0.8 (19)	3.4 (81)	4.2 (21)
NE—P5	1.0 (16)	5.1 (84)	6.0 (21)	0.5 (6)	7.5 (94)	8.0 (28)
NE—P6	1.1 (15)	5.9 (85)	6.9 (23)	0.5 (7)	6.4 (93)	6.9 (23)
W—P1	2.0 (20)	8.0 (80)	10.0 (25)	1.0 (9)	10.1 (91)	11.1 (27)
W—P2	1.1 (10)	9.8 (90)	10.9 (21)	0.7 (4)	16.7 (96)	17.4 (34)
W—P3	1.5 (38)	2.3 (62)	3.8 (16)	0.7 (14)	4.1 (86)	4.8 (21)
W—P4	2.5 (28)	6.3 (72)	8.8 (19)	1.1 (9)	10.6 (91)	11.7 (26)
W—P5	1.5 (16)	7.7 (84)	9.2 (26)	0.6 (6)	9.0 (94)	9.5 (27)
W—P6	1.6 (63)	1.0 (37)	2.6 (14)	0.8 (37)	1.3 (63)	2.1 (11)

剖面	100—150 cm 土层			150—200 cm 土层		
	SOCt	SICt	SCt	SOCt	SICt	SCt
NE—P1	0.6 (22)	2.3 (78)	2.9 (19)	0.6 (12)	4.4 (88)	5.0 (33)
NE—P2	0.8 (8)	9.2 (92)	10.0 (23)	0.7 (8)	8.8 (92)	9.5 (22)
NE—P3	0.5 (6)	8.7 (94)	9.2 (19)	0.5 (7)	7.0 (93)	7.5 (16)
NE—P4	0.5 (17)	2.4 (83)	2.9 (14)	0.5 (7)	6.8 (93)	7.3 (36)
NE—P5	0.5 (7)	6.4 (93)	6.9 (25)	0.6 (8)	6.7 (92)	7.3 (26)
NE—P6	0.6 (7)	7.4 (93)	8.0 (27)	0.6 (8)	7.2 (92)	7.8 (26)
W—P1	0.8 (9)	8.5 (91)	9.4 (23)	0.8 (8)	9.5 (92)	10.3 (25)
W—P2	0.6 (4)	14 (96)	14.6 (28)	0.5 (6)	7.8 (94)	8.4 (16)
W—P3	0.7 (11)	5.6 (89)	6.2 (27)	0.6 (8)	7.7 (92)	8.4 (36)
W—P4	0.6 (5)	13.4 (95)	14.0 (31)	0.7 (6)	9.8 (94)	10.4 (23)
W—P5	0.6 (7)	7.7 (93)	8.3 (24)	0.6 (8)	7.2 (92)	7.8 (22)
W—P6	0.5 (8)	5.6 (92)	6.1 (34)	0.6 (7)	6.9 (93)	7.5 (41)

注:SOC 和 SIC 括号中数值分别为 SOC 和 SIC 占 SC 的百分比,SC 括号中数值为不同深度 SC 占 0—2 m 土体 SC 的百分比。

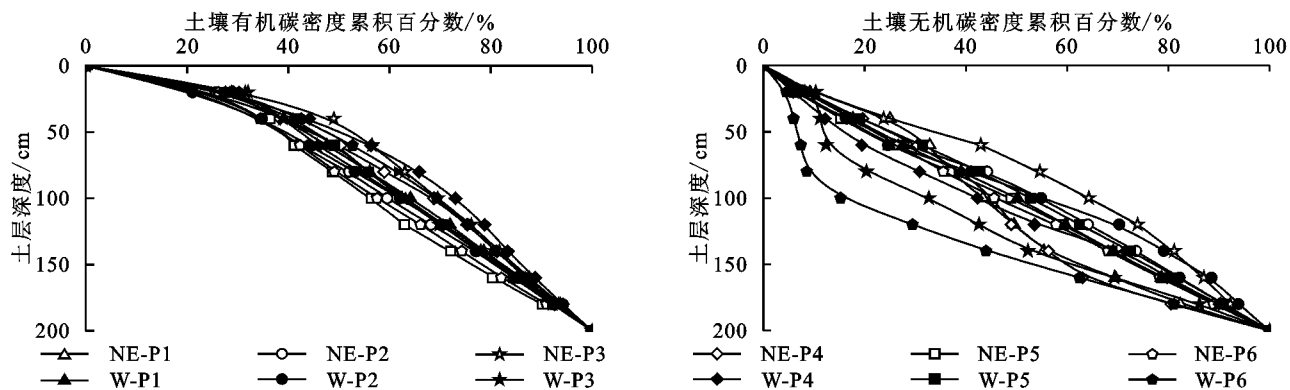


图 4 六道沟小流域不同坡向地形序列土壤有机碳和无机碳密度垂直分布特征

2.3 影响土壤有机碳和无机碳含量的因素

土壤理化性质是影响土壤有机碳和无机碳含量及其垂直分布的重要因素。在本研究中土壤有机碳主要富集在 0—50 cm 土层,而无机碳主要淀积在 50—150 cm 土层,因此对 0—50 cm 土体有机碳含量、50—150 cm 土体无机碳含量与相应土层理化性质的关系进行了回归分析。从图 5 可以看出,不同坡向 0—50 cm 土体有机碳含量和 50—150 cm 土体无机碳含量均与土壤 pH 呈显著的负相关关系($r=0.49\sim0.70, p<0.01$)。研究表明,土壤 pH 通过改变微生物种类和活性,从而影响有机质的分解状况。在一定 pH 范围内,高 pH 可以提高有机质的溶解性和分散性,促进有机质的分解^[30],因此表层(0—50 cm)有机质含量随着 pH 升高而降低(图 5)。淀积层(50—150 cm)无机碳含量随 pH 升高而降低,这可能与高 pH 值更容易形成碳酸钙结核有关,碳酸钙结核的形成将减少土壤细粒物质中无机碳含量。土壤容重与 0—50 cm 土体有机碳含量和 50—150 cm 无机碳含量都有极显著的相关性,但趋势相反(图 5)。容重与土壤有机碳的相关系数较无机碳高,前者呈负相关($r=0.53\sim0.57, p<0.01$),而后者呈正相关($r=0.40\sim0.43, p<0.05$)(图 5)。同样,土壤总孔隙度与 0—50 cm 土体有机碳含量和 50—150 cm 土体无机碳含量都有极显著的相关性,前者呈正相关($r=0.45\sim0.48, p<0.01$),而后者呈负相关($r=0.55\sim0.63, p<0.01$)。研究表明,土壤有机碳可以改善土壤结构和通透性,从而提高土壤孔隙度;而土壤中碳酸钙在一定条件下能够形成结核和钙积层,从而降低土壤孔隙度和增加土壤容重^[31]。不同坡向 0—50 cm 土体有机碳含量与黏粒含量均没有显著的相关关系,而 50—150 cm 土体无机碳含量与黏粒含量呈极显著的正相关($r=0.67\sim0.87, p<0.01$)。Hassink^[32] 研究结果表明黏粒和粉粒对有机碳具有保护作用,并且惠波等^[33] 也揭示了土壤有机碳含量与黏粒和粉粒含

量之间具有极显著的正相关关系,因为黏粒含量在一方面可以提高土壤有效含水量;另一方面它能够较强烈地吸附土壤中的有机质,降低微生物对土壤有机质的分解。但是在该研究中,土壤黏粒的含量相对较小(平均值为 16.86%),且与有机碳含量的负相关关系并不显著($p>0.05$),而负相关关系的机理还有待于进一步深入的研究。相反,50—150 cm 土体无机碳含量随着黏粒含量的增加而增加,这主要是由于成土过程中碳酸钙和黏粒在降雨的作用下可随根孔或动物孔隙同时向剖面下部淋溶和淀积^[34]。不同坡向 0—50 cm 土体有机碳含量与土壤含水量呈显著的负相关关系($r=0.35\sim0.69, p<0.05$),而 50—150 cm 土体无机碳含量与土壤含水量呈极显著的正相关关系($r=0.50\sim0.70, p<0.01$)。土壤水分不仅是土壤中营养物质的溶剂,亦是物质迁移的载体,水分含量和分布会影响土壤微生物的数量和活性,从而改变土壤有机质的矿化速率,同时也能够促进土壤中碳酸钙的淋溶和淀积。汤洁等^[35] 研究结果表明土壤有机质的分解速率随土壤含水量的增加而增加,到达最适宜的土壤水分条件后,又随土壤水分含量的增加而减小。而且在本研究中,土壤水分及其他理化性质在垂直方向上还存在着不同程度的变异性,所以在土壤剖面尺度上,土壤碳和理化性质之间的关系更为复杂,不能只用简单的线性关系来描述。

综上所述,除土壤 pH 外,容重、总孔隙度、黏粒含量和土壤含水量对表层(0—50 cm)有机碳和淀积层(50—150 cm)无机碳的影响不同。因此,在研究土壤碳平衡过程中,应充分考虑这种关系所导致的相互补偿作用,即有机碳的增加,可能意味着无机碳的减少,或者反之。在我国黄土高原地区研究退耕还林草工程引起的土壤碳变化时,仅考虑有机碳或无机碳变化,很可能对土壤碳库变化分析造成较大偏差,因此,需要同时考虑剖面不同深度土壤有机碳和无机碳含量及其分布特征。

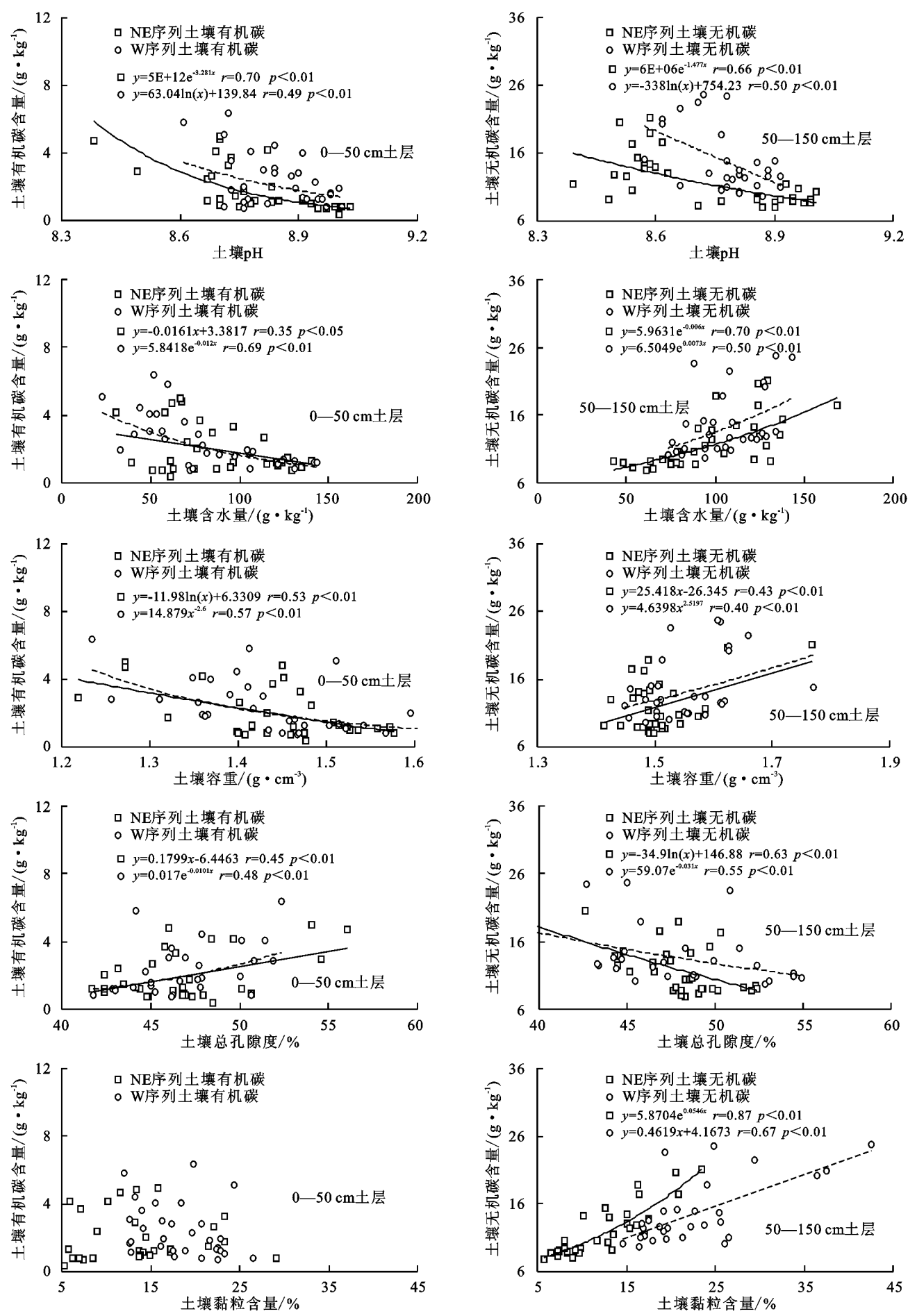


图 5 土壤有机碳和无机碳含量与土壤 pH、容重、总孔隙度、黏粒含量及土壤含水量之间的关系

3 结论

六道沟小流域地形序列土壤有机碳含量在 0—50 cm 土层内随土层深度增加而显著降低, 50 cm 土层以下基本趋于稳定, 且剖面上层(0—50 cm)有机碳含量显著高于剖面下层(50—200 cm) ($p < 0.05$), 但在同一深度土层(0—50, 50—200, 0—200 cm)不同坡向林地和草地土壤有机碳平均含量均没有显著差异 ($p > 0.05$)。与有机碳相比, 无机碳含量相对较高并且主要在剖面下部(50 cm 以下)不同深度土层富集。NE 序列林地和草地无机碳剖面平均含量接近 ($p > 0.05$), 而 W 序列林地无机碳剖面平均含量显著高于草地 ($p < 0.05$); 不同坡向间草地剖面无机碳平均含量无显著差异 ($p > 0.05$), 但不同坡向林地剖面无机碳平均含量表现为 W 序列显著高于 NE 序列 ($p < 0.05$)。0—50 cm 土层有机碳含量与 pH、容重和土壤含水量均呈极显著负相关关系, 而与土壤总孔隙度呈极显著正相关关系; 50—150 cm 土层无机碳含量与 pH 和土壤总孔隙度均呈极显著负相关关系, 而与容重、黏粒含量和土壤含水量均呈极显著正相关关系。NE 序列和 W 序列 2 m 土体总碳密度相当, 分别为 15.2~47.4, 18.3~51.3 kg/m², 其中无机碳密度占 78%~94%, 1—2 m 土层总碳密度占 2 m 土体总碳密度的 35%~74%。若只考虑土壤有机碳库或只考虑浅层 1 m 土壤碳库, 六道沟小流域 2 m 土体总碳储量将被低估 88% 和 51%。未来的研究应充分考虑黄土厚度、不同深度土层有机碳和无机碳的分配对黄土高原碳储量的影响, 为进一步理解黄土高原土壤碳循环及陆地碳库精确预测提供科学依据。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [2] Eswaran H, Reich P, Kimble J. Global carbon stocks [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [4] 顾成军, 史学正, 于东升, 等. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子—土壤类型与土地利用比较 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 425-432.
- [5] Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, et al. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 486-495.
- [6] 杨帆, 黄来明, 李德成, 等. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1226-1236.
- [7] 候晓静, 杨劲松, 王相平, 等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 818-827.
- [8] Zhao L P. Soil organic carbon in clay and silt sized particles in Chinese mollisols: Relationship to the predicted capacity [J]. *Geoderma*, 2006, 132(3): 315-323.
- [9] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 142(3): 184-194.
- [10] Qiu L, Wei X, Gao J, et al. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon along an afforestation chronosequence [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1/2): 237-251.
- [11] Wissing L, Kölbl A, Vogelsang V, et al. Organic carbon accumulation in a 2000-year chronosequence of paddy soil evolution [J]. *Catena*, 2011, 87(3): 376-385.
- [12] Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China [J]. *Geoderma*, 2007, 138(1): 119-126.
- [13] Mi N A, Wang S, Liu J, et al. Soil inorganic carbon storage pattern in China [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2380-2387.
- [14] Wu H, Guo Z, Gao Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 413-421.
- [15] 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 等. 塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 [J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1516-1522.
- [16] 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [17] Zhang F, Wang X, Guo T, et al. Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: Implications of deep soils [J]. *Catena*, 2015, 126(3): 68-74.
- [18] Tan W F, Zhang R, Cao H, et al. Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess Plateau region of China [J]. *Catena*, 2014, 121(7): 22-30.
- [19] Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, et al. Aggregation and soil organic carbon fractions under different land uses on the tableland of the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2014, 115(3): 19-28.
- [20] Zhao W, Zhang R, Huang C Q, et al. Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou Watershed on the loess plateau [J]. *Catena*, 2016, 139(3): 191-198.
- [21] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's "Grain for Green" Program: A synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.