

黄土丘陵区表层土壤有机碳沿降水梯度的分布

孙 龙^{1,2} 张光辉^{1,3*} 栾莉莉³ 李振炜⁴ 耿 韧³

(¹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; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; ⁴中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘 要 沿 368~591 mm 降水量梯度选取 7 个调查地点、共 63 个调查样点, 在每个样点选择恢复年限相近的林地、草地和农地, 调查表层(0~30 cm) 土壤有机碳的分布特征, 分析气候、土层深度和土地利用类型等因素对土壤有机碳分布的影响。结果表明: 在黄土丘陵区 368~591 mm 的降水量范围内, 表层土壤有机碳含量表现为草地(8.70 g·kg⁻¹) > 林地(7.88 g·kg⁻¹) > 农地(7.73 g·kg⁻¹), 土壤有机碳密度表现为草地(20.28 kg·m⁻²) > 农地(19.34 kg·m⁻²) > 林地(17.14 kg·m⁻²)。林地、草地、农地的土壤有机碳含量无显著差异, 综合 3 种土地利用类型的数据分析表明, 不同降雨梯度下土壤有机碳含量差异显著($P < 0.001$), 土壤有机碳含量($r = 0.838$, $P < 0.001$) 与年均降水量间存在显著线性正相关关系; 由北向南(以最北端鄂尔多斯为起点), 土壤有机碳含量沿着 368~591 mm 的年均降水量梯度的递增速率为 0.04 g·kg⁻¹·mm⁻¹, 土壤有机碳密度的递增速率为 0.08 kg·m⁻²·mm⁻¹。年均降水量、土壤黏粒含量、林下枯落物蓄积量和农作物根系密度可较好地模拟表层土壤有机碳分布。

关键词 黄土丘陵区; 有机碳; 降水梯度; 表层土壤; 土地利用

Distribution of soil organic carbon in surface soil along a precipitation gradient in loess hilly area. SUN Long^{1,2}, ZHANG Guang-hui^{1,3*}, LUAN Li-li³, LI Zhen-wei⁴, GENG Ren³ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ⁴Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China).

Abstract: Along the 368–591 mm precipitation gradient, 7 survey sites, *i. e.* a total 63 investigated plots were selected. At each sites, woodland, grassland, and cropland with similar restoration age were selected to investigate soil organic carbon distribution in surface soil (0–30 cm), and the influence of factors, *e. g.* climate, soil depth, and land uses, on soil organic carbon distribution were analyzed. The result showed that, along the precipitation gradient, the grassland (8.70 g·kg⁻¹) > woodland (7.88 g·kg⁻¹) > farmland (7.73 g·kg⁻¹) in concentration and the grassland (20.28 kg·m⁻²) > farmland (19.34 kg·m⁻²) > woodland (17.14 kg·m⁻²) in density. The differences of soil organic carbon concentration of three land uses were not significant. Further analysis of pooled data of three land uses showed that the surface soil organic carbon concentration differed significantly at different precipitation levels ($P < 0.001$). Significant positive relationship was detected between mean annual precipitation and soil organic carbon concentration ($r = 0.838$, $P < 0.001$) in the of pooled data. From south to north (start from northernmost Ordos), *i. e.* along the 368–591 mm precipitation gradient, the soil organic carbon increased with annual precipitation 0.04 g·kg⁻¹·mm⁻¹, density 0.08 kg·m⁻²·mm⁻¹. The soil organic carbon distribution was predicted with mean annual precipitation, soil clay content, plant litter in woodland, and root density in farmland.

Key words: loess hilly area; organic carbon; precipitation gradient; surface soil; land use.

本文由中国科学院“百人计划”择优支持项目、国家自然科学基金重点项目(41530858)、国家自然科学基金项目(41271287)和国家自然科学基金创新研究群体项目(41321001)资助 This work was supported by the Hundred Talents Project of the Chinese Academy of Sciences, the Key Program of National Natural Science of China (41530858), the General Program of National Natural Science Foundation of China (41271287) and the Fund for Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China (41321001).

2015-06-08 Received, 2015-12-08 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

土壤是陆地生态系统重要的碳库^[1],对农业生产和全球碳循环具有重要作用^[2].黄土丘陵区严重的水土流失必然会导致土壤有机碳流失和土地退化,给区域农业生态和经济发展带了巨大阻碍.为有效控制水土流失,黄土高原采取了长期的植被恢复措施,特别是退耕还林(草)工程的有效实施,极大地改善了黄土高原的生态环境.植被恢复被认为是提高土壤固碳能力的有效方式^[3-4],长期的植被恢复使得黄土高原大面积的坡耕地转变为林草地^[4-6].生态系统净初级生产力的显著增大及植被恢复对土壤性质的改善势必影响土壤碳的含量及其动态^[4,7-9].因此明确黄土丘陵区植被恢复后土壤有机碳分布特征,对于评价植被恢复固碳和农业可持续发展具有重要意义.

土壤有机碳受降水、植被类型、土壤深度、土地利用类型、土壤质地等多种因素影响^[4,10-15].土壤有机碳与降水量具有显著相关性,但其相关性的正负又因降水量的多少而不同^[7].土壤有机碳与温度间通常表现为负相关^[16-17].降水、温度等气候因素对土壤有机碳的影响随着土壤深度的增加而减弱.相比降水因素,土壤有机碳在垂向分布上与年均温的相关性更大^[16].与气候因素相比,植被与土壤有机碳垂直分布的关系更为密切^[18-19].Batjes等^[20]发现,距离土表100 cm深度内的土壤有机碳大部分固持在距离表层30 cm土壤内,而表层土壤极易受到土地利用变化的影响^[21].不同土地利用类型的土壤有机碳含量差异显著^[11,22].相对于撂荒,植被或农作物生长利于土壤固碳^[23-24].由植被恢复等导致的土壤有机碳变化又受到年均降水量的影响^[7],如牧草地转变为林地时,土壤有机碳含量可能维持稳定或减少^[25-26].降水量较大的地区通常会减少. Berthrong等^[7]指出,除了受年均降水量影响,土壤有机碳也受到林龄的影响,在黄土高原主要表现为受退耕年限的影响^[6].此外,土壤有机碳分布特征也受到土壤质地的影响,土壤有机碳与黏粒含量关系密切,原因是黏粒对土壤有机碳具有保护作用^[17,27-29].

植被恢复能够影响生态系统中土壤有机碳动态及其他养分循环过程^[24],而降水量能影响植被的生长和分布.在干旱和半干旱地区,降水量是生态限制因子^[4],对植被生长和分布的影响尤为显著,降水梯度可能会通过影响植被分布进而影响土壤有机碳含量.在黄土丘陵区退耕还林(草)工程实施过程中,土壤尤其是表层土壤有机碳对降水梯度的响应尚不清楚.因此,本文在黄土丘陵区沿368~591 mm

年降水量梯度,调查3种典型土地利用类型下的土壤有机碳分布特征,分析气候、土层深度和土地利用类型对土壤有机碳分布的影响,以助于理解区域尺度植被恢复对土壤有机碳的影响,为有机碳的估算提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

在黄土丘陵区选取研究样点,基于1981—2010年的平均降水量数据,沿着368~591 mm年降水量梯度近乎等间距地选取7个调查地点(图1).调查样线南起陕西宜君,向北经过富县、延安、子长、子洲、榆林,北至内蒙古鄂尔多斯,总长508 km.年均降水量从最高的宜君(591 mm)递减至鄂尔多斯(368 mm),相邻两样点间降水量梯度均值为37.2 mm.样线横跨森林植被带(年均降水量>550 mm)、森林草原植被带(年均降水量在450~550 mm)和典型草原植被带(年均降水量在300~450 mm).年均温最大为9.9℃(富县),最小为6.7℃(鄂尔多斯).各采样点土壤类型为黄绵土,土壤质地从南到北逐渐变粗,宜君、富县、延安、子长、子洲为粉壤土,而榆林和鄂尔多斯为砂壤土.采样点其他基本信息见表1.

1.2 样品采集与数据分析

样品野外采集时间为2014年7—9月.沿着降水量梯度的调查样线,近似等降水量梯度选取7个调查地点,每个调查地点选取林地、草地和农地3种土地利用类型,每种土地利用类型分别选取3个采样点,共计63个采样点.林地选取恢复年限约为15年的刺槐(*Robinia pseudoacacia*),鄂尔多斯因环境条件缺少成林刺槐,用相近年限的杨树林代替.草地



图1 调查样点布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of survey sites.

表 1 采样点基本信息表
Table 1 Basic information of sampling sites

采样点 Sampling site	土地利用类型 Land use type	海拔 Elevation (m)	年均温 Annual average temperature (°C)	年均降水量 Annual average participation (mm)	坡向 Slope aspect	坡度 Slope gradient (%)	盖度 Coverage (%)	优势种 Dominant species
宜君 Yijun	农地 Cropland	1026	8.5	591	NW25°	0.18	78	玉米 <i>Zea mays</i>
	草地 Grassland	1043	8.5	591	NW30°	0.45	95	小叶早熟禾、艾蒿 <i>Poa paucifolia</i> , <i>Artemisia argyi</i>
	林地 Woodland	1094	8.5	591	NW55°	0.27	95	刺槐、小叶早熟禾、艾蒿 <i>Robina pseudoacacia</i> , <i>Poa paucifolia</i> , <i>Artemisia argyi</i>
富县 Fuxian	农地 Cropland	1006	9.9	542	NW56°	0.34	78	玉米 <i>Zea mays</i>
	草地 Grassland	1085	9.9	542	NW65°	0.31	87	少花米口袋、披针苔草 <i>Gueldenstaedtia verna</i> , <i>Carex lanceolata</i>
	林地 Woodland	978	9.9	542	NW70°	0.29	80	刺槐、小叶早熟禾 <i>Robina pseudoacacia</i> , <i>Poa paucifolia</i>
延安 Yan'an	农地 Cropland	1113	9.2	514	NW46°	0.18	83	玉米 <i>Zea mays</i>
	草地 Grassland	1140	9.2	514	NW38°	0.32	89	芨芨草、小叶早熟禾 <i>Achnatherum splendens</i> , <i>Poa paucifolia</i>
	林地 Woodland	1210	9.2	514	NW60°	0.37	74	刺槐、长芒草、小叶早熟禾 <i>Robina pseudoacacia</i> , <i>Stipa bungeana</i> , <i>Poa paucifolia</i>
子长 Zichang	农地 Cropland	1079	9.0	437	NW40°	0.29	86	玉米 <i>Zea mays</i>
	草地 Grassland	1319	9.0	437	NW30°	0.21	91	小叶早熟禾 <i>Poa paucifolia</i>
	林地 Woodland	1027	9.0	437	NW28°	0.23	29	刺槐、小叶早熟禾 <i>Robina pseudoacacia</i> , <i>Poa paucifolia</i>
子洲 Zizhou	农地 Cropland	937	8.9	411	NW62°	0.14	83	玉米 <i>Zea mays</i>
	草地 Grassland	1057	8.9	411	NW51°	0.47	87	小叶早熟禾、长芒草 <i>Poa paucifolia</i> , <i>Stipa bungeana</i>
	林地 Woodland	1037	8.9	411	NW32°	0.65	69	刺槐、虎尾草、小叶早熟禾 <i>Robina pseudoacacia</i> , <i>Chloris virgate</i> , <i>Poa paucifolia</i>
榆林 Yulin	农地 Cropland	1190	8.8	383	NW40°	0.11	78	玉米 <i>Zea mays</i>
	草地 Grassland	1127	8.8	383	NW53°	0.19	47	褐穗莎草 <i>Cyperus fuscus</i>
	林地 Woodland	1197	8.8	383	NW74°	0.12	17	刺槐、褐穗莎草、长芒草 <i>Robina pseudoacacia</i> , <i>Cyperus fuscus</i> , <i>Stipa bungeana</i>
鄂尔多斯 Ordos	农地 Cropland	1421	6.7	368	NW51°	0.12	81	玉米 <i>Zea mays</i>
	草地 Grassland	1433	6.7	368	NW36°	0.32	74	小叶早熟禾、长芒草 <i>Poa paucifolia</i> , <i>Stipa bungeana</i>
	林地 Woodland	1416	6.7	368	NW30°	0.16	34	小叶杨、长芒草 <i>Populus simonii</i> , <i>Poa paucifolia</i>

选取恢复年限为 10 年左右并且优势种相近的草地, 主要草本植物有铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、茵陈蒿 (*Artemisia capillaries*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 和早熟禾 (*Poa annua*) 等。农地选取区域内广泛分布的玉米耕地。开挖前清除地表植被, 开挖深度为 30 cm (即本研究定义的表层深度)。沿垂向每 10 cm 一层 (共 3 层), 使用容积为 100 cm³ 的环刀分层采样测定土壤容重, 每层 3 个重复。同时分层采集土样测定有机碳含量, 采用 S 型取样、充分混合后装入塑封袋带回实验室备用。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,

测定重复 2 次并取均值。土壤质地用激光粒度仪 (Mastersizer 2000) 测量。同时调查 3 种土地利用类型表土 (10 cm) 根系密度、林地和草地枯落物蓄积量、草地生物量, 每个样点各土地利用类型重复测定 5 个样方, 取平均值进行数据分析。根系密度指质量密度, 用内径 10 cm 的采样圆采集土样, 洗根并在 65 °C 下烘干 12 h 后称量。采用 1 m² 标准样方收集枯落物在 65 °C 下烘干 24 h 称量, 测定枯落物蓄积量 (表 2)。生物量采用 1 m² 标准样方全部收获法, 并在 65 °C 下烘干 24 h 称量。土壤有机碳密度用来表征土壤有机碳库储量, 计算公式如下:

表 2 土壤有机碳影响因子统计分析

Table 2 Statistical analysis of factors influencing soil organic carbon

影响因子 Influencing factor		最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	变异系数 CV (%)
降水量 Precipitation (mm)		591.00	368.00	463.71	18.5
枯落物蓄积量 Accumulation of plant litter ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	林地 Woodland	10.22	3.64	6.66	37.9
	草地 Grassland	2.07	0.80	1.42	34.8
草地生物量 Biomass of grassland ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)		254.81	80.26	153.13	38.7
黏粒 Clay (%)	林地 Woodland	20.69	10.02	14.70	27.3
	草地 Grassland	24.91	9.29	15.60	37.2
	农地 Cropland	34.15	7.73	17.27	52.4
根系密度 Root density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	林地 Woodland	2.55	0.52	1.09	66.2
	草地 Grassland	4.00	0.97	2.66	38.3
	农地 Cropland	0.16	0.00	0.07	100.1

$$SOCD_i = D_i \times \rho_i \times SOC_i \times (1 - \alpha_i) / 100 \quad (1)$$

式中: 下标 i 代表土壤层次; $SOCD_i$ 是第 i 土层单位面积土壤有机碳密度, 即单位面积的土壤有机碳含量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); D 为土层厚度 (cm); ρ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); α 为土壤中 $> 2 \text{ mm}$ 的砾石含量 (%), 黄土丘陵区砾石含量较少, 取值为 0.5% [17]。

采用 SPSS 19.0 软件进行数据的统计分析. 采用 One-way ANOVA 的最小显著性差异法 (LSD) 分析不同土地利用类型、降水量等因子对土壤有机碳含量、有机碳密度影响的差异性. 有机碳含量和密度与其影响因子之间的相关性采用 Pearson 双变量相关分析, 降水量对有机碳含量的影响程度采用一元线性回归分析. 土壤有机碳预测方程的拟合采用逐步多元线性回归。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳分布

2.1.1 土壤有机碳的垂直分布 研究区 3 种土地利用类型的土壤有机碳含量均值表现为草地 ($8.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地 ($7.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 农地 ($7.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 3 种土地利用类型的土壤有机碳含量在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 和 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的大小关系与均值一致 (图 2), 但在 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层, 农地土壤有机碳含量大于另外两种类型. 不同土地利用类型的土壤有机碳含量 ($P=0.87$)、密度 ($P=0.79$) 均无显著差异. 表层土壤 ($0 \sim 30 \text{ cm}$) 有机碳含量均随着土壤深度的增加而减小. 林地、草地、农地在 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层的土壤有机碳含量较 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层分别降低 54% 、 58% 、 32% , 但农地不同深度土层有机碳含量无显著差异。

2.1.2 土壤有机碳沿降雨梯度的分布 林地、草地、农地表层土壤有机碳含量的变化范围分别为 4.31

~ 13.20 、 $5.14 \sim 14.81$ 、 $4.65 \sim 13.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数分别为 52% 、 46% 、 44% . 从最北端的鄂尔多斯到最南端的宜君, 土壤有机碳含量随着随纬度的增大而减小 (图 3). 年均降水量最大的宜君土壤有机碳含量较年均降水量最小的鄂尔多斯高 140% . 在 $368 \sim 591 \text{ mm}$ 年均降水量区间, 土壤有机碳含量由北向南递增速率为 $0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$.

在 $368 \sim 591 \text{ mm}$ 年均降水量区间内, 林地、草地、农地 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层土壤有机碳密度变化范围分别为 $10.95 \sim 30.99$ 、 $11.38 \sim 37.63$ 、 $9.14 \sim 32.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 变异系数分别为 45% 、 47% 、 48% . 年均降水量最大的宜君土壤有机碳含量较年均降水量最小的鄂尔多斯高 119% . 在 $368 \sim 591 \text{ mm}$ 年均降水量区间, 土壤有机碳密度由北向南递增速率为 $0.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$.

2.2 土壤有机碳分布的影响因素

林地土壤有机碳含量与年均降水量 ($r=0.914$, $P=0.004$)、枯落物蓄积量 ($r=0.919$, $P=0.003$)、土壤黏粒含量 ($r=0.881$, $P=0.009$) 呈显著相关, 与温度等其他因子相关性不显著. 林地有机碳含量与年均降水的双变量相关性 ($r=0.914$, $P=0.004$) 大于控

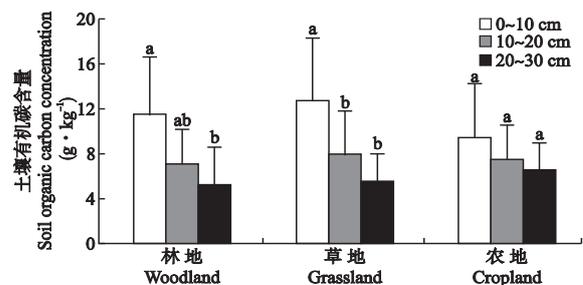


图 2 不同土壤深度土壤有机碳含量分布

Fig. 2 Soil organic carbon concentration of different soil depths in different land uses.

不同字母代表同种土地利用类型不同土层的差异显著 ($P < 0.05$). Different letters denoted the significant differences among different soil layers at the same land use type at 0.05 level.

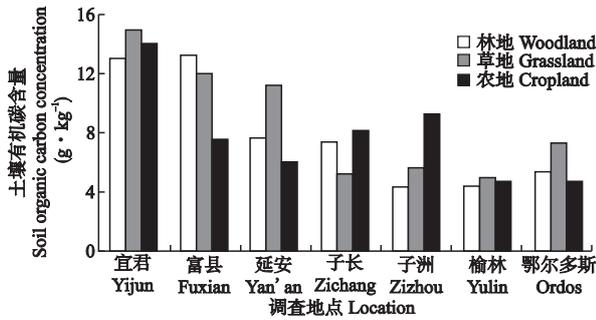


图3 土壤有机碳含量随降水梯度的变化

Fig. 3 Change of soil organic carbon concentration along increasing mean annual precipitation gradient.

制温度因子的偏相关分析结果 ($r = 0.899$, $P = 0.015$)。草地有机碳含量与年均降水量 ($r = 0.917$, $P = 0.004$)、草地生物量 ($r = 0.841$, $P = 0.018$)、枯落物蓄积量 ($r = 0.785$, $P = 0.036$)、黏粒含量 ($r = 0.778$, $P = 0.039$) 显著相关, 与温度等其他因子无关。草地有机碳含量与年均降水量的双变量相关性 ($r = 0.917$, $P = 0.004$) 小于控制温度因子的偏相关分析结果 ($r = 0.968$, $P = 0.001$)。农地有机碳含量仅与根系密度显著相关 ($r = 0.820$, $P = 0.024$) , 与黏粒含量 ($r = 0.710$, $P = 0.07$) 和降水量 ($r = 0.683$, $P = 0.091$) 相关性系数较大, 但没有达到显著水平。

由于3种土地利用类型的土壤有机碳含量差异不显著, 综合3种土地利用类型土壤有机碳含量数据的方差分析显示, 降水量对土壤有机碳含量的影响极显著 ($P < 0.001$)。进一步的一元线性回归结果 (图4) 表明, 在368~591 mm的年均降水量范围内, 土壤有机碳含量与年均降水量之间存在显著的线性正相关关系 ($r = 0.838$, $P < 0.001$) , 说明降水量能够显著影响表层土壤有机碳的分布。

在各因子间, 林地和草地枯落物蓄积量、草地生物量、林地和农地的黏粒含量均与年均降水量存在显著的相关性 ($P < 0.05$) , 即与年均降水量存在多重

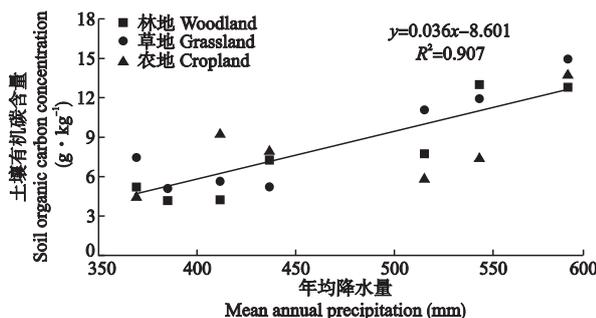


图4 年均降水量与土壤有机碳含量的关系

Fig. 4 Relationship between mean annual precipitation and soil organic carbon.

表3 表层土壤有机碳预测方程

Table 3 Relationships between surface soil organic carbon concentration and affecting factors

土地利用类型 Land use type	回归方程 Regression equation	R	P
林地 Woodland	$SOC = 1.38Litter - 1.33$	0.92	0.003
草地 Grassland	$SOC = 0.055Rain + 0.205$	0.98	0.001
农地 Cropland	$SOC = 32.806Root + 0.183Clay + 2.412$	0.96	0.007

Litter: 枯落物蓄积量 Accumulation of litter mass ($g \cdot m^{-2}$); Rain: 年均降水量 Annual average precipitation (mm); Root: 根系密度 Root mass density ($kg \cdot m^{-3}$); Clay: 黏粒含量 Clay content (%).

共线性, 采用逐步方法对不同土地利用类型下的土壤有机碳含量进行多元线性回归 (表3)。结果表明, 林地表层土壤有机碳含量的变化可以用枯落物蓄积量这一单一变量较好的解释, 而年均降水量是影响草地表层有机碳含量的主要因子; 农地表层土壤有机碳含量主要受根系和黏粒含量的影响。

3 讨论

通常认为, 不同土地利用类型下的土壤有机碳存在显著差异^[10-11]。但本文中3种土地利用类型的有机碳含量间并无显著差异, 这可能是由于采样点的土壤性状相近, 如黏粒含量变化范围较小, 导致有机碳变化不显著^[17, 28-29]; 也可能是因为在干旱的黄土高原, 降水量是主要的生态控制因子, 水热状况决定了植被生物量的多少^[4]和植被群里枯落物分解过程, 进而影响了生态系统中有有机碳向土壤中输送的过程。不同土地利用类型下土壤有机碳含量均值的大小关系与以往的研究结果^[10]一致。草地的土壤有机碳含量随着土壤深度增加的降幅最大, 其次是林地, 而农地土壤有机碳含量3层间无显著差异。这可能是由于草地的枯落物及根系主要集中于0~10 cm土层, 林地的根系分布相对草地更深, 因此草地土壤有机碳含量差值随着土层深度的增加更明显。农地由于翻耕等农事活动的干扰, 导致不同土层间土壤有机碳含量差异不显著, 而农地土壤有机碳密度在不同土层的差异主要由底层土壤较为密实引起。

土壤有机碳含量随着年均降水量的增大而线性增大。在黄土丘陵区368~591 mm的降水量范围内, 降水不仅是植被生长的主要生态限制因子^[4], 还是土壤有机碳动态的主控因子。在多年平均降水量最低的鄂尔多斯, 林地、草地的土壤有机碳反而略高于多年平均降水量较高的榆林, 可能是鄂尔多斯的植被类型与榆林及以南区域存在较大差别, 在样地选择时用林龄相近的杨树树林和草地作为替代的结

果. 农地土壤有机碳含量随年均降水量的变化趋势可能主要来源于翻耕、灌溉和施肥等农事活动的干扰. 土壤中有机质输入量在很大程度上取决于降水、土壤特性、植被生长等, 而土壤中有机物质的分解又依赖于枯落物基质质量、土壤水热状况等^[18]. 本研究选取样地的植被恢复年限相近, 降水量的梯度差异表现为植被生长、枯落物分解和地下根系延伸等有机质输入过程的差异, 进而导致土壤有机碳含量与年均降水量显著相关. 土壤有机碳沿降水梯度的变化趋势与 Chang 等^[4]在黄土高原 380 ~ 650 mm 降水量的研究结果一致, 但与 Berthrong 等^[7]在拉普拉塔盆地 600 ~ 1500 mm 年均降水量下的研究结果恰好相反, 说明土壤有机碳随着降水量的变化可能是一个先增加后减小的过程.

林地土壤有机碳的补充和积累主要来自枯落物、根系分泌物等^[23]. 本研究结果表明, 降水对林地表层土壤有机碳含量的解释程度略低于枯落物, 枯落物蓄积量能很好地解释林地表层土壤有机碳含量变异, 因此认为林地表层土壤有机碳含量绝大部是由林下枯落物分解贡献, 而根系的影响并不显著. 降水量直接影响植被生长状况, 从而通过改变与植被生长状况密切相关的枯落物凋落量而进一步影响土壤有机碳的动态过程. 温度、降水和枯落物基质质量共同决定枯落物的分解速率^[7, 18]. 在分析降水量对土壤有机碳差异的影响时, 采用控制温度变量对土壤有机碳影响的偏相关分析, 结果显示, 林地的相关性降低、草地的相关性上升, 说明温度对林地枯落物的分解具有一定贡献, 但温度与土壤有机碳的相关性不显著, 显示了影响因素交互作用的复杂性. 相比林地, 降水量能更好地解释草地表层土壤有机碳含量, 说明草本的有机质输入途径(如地上枯落物分解和地下根系生长)受降水量的影响显著. 农地土壤有机碳含量的差异主要来源于根系密度和黏粒含量, 黏粒含量能较好地解释农地土壤有机碳的变异, 这与黏粒对土壤有机碳的保护作用有关^[27-29].

4 结 论

在黄土丘陵区 368 ~ 591 mm 的年均降水量范围内, 表层(0 ~ 30 cm)土壤有机碳含量均值表现为草地(8.70 g · kg⁻¹) > 林地(7.88 g · kg⁻¹) > 农地(7.73 g · kg⁻¹). 林地、草地、农地的土壤有机碳无显著差异. 综合 3 种土地利用类型的数据结果表明, 不同降雨梯度土壤有机碳含量差异极显著($P < 0.001$), 土壤有机碳含量($r = 0.838$, $P < 0.001$)与年

均降水量之间存在显著的线性正相关关系. 由北向南(以最北端鄂尔多斯为起点), 土壤有机碳含量沿着 368 ~ 591 mm 的年均降水量梯度的递增速率为 0.04 g · kg⁻¹ · mm⁻¹, 土壤有机碳密度的递增速率为 0.08 kg · m⁻² · mm⁻¹.

土壤有机碳的差异主要来自年均降水量、土壤黏粒含量、枯落物蓄积量和农作物根系密度. 林地和草地土壤有机碳主要受年均降水量、枯落物蓄积量和土壤黏粒含量的影响. 农地土壤有机碳含量差异主要来自农作物根系密度和土壤黏粒含量的差异. 结果有助于理解植被恢复对区域尺度土壤有机碳的影响机制及土壤有机碳的估算.

参考文献

- [1] Schlesinger WH. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, **348**: 232 - 234
- [2] Gu C-J (顾成军), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升), et al. Main factor controlling SOC spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2013, **50**(3): 425 - 432 (in Chinese)
- [3] Weng B-Q (翁伯琦), Zheng X-Z (郑祥洲), Ding H (丁洪), et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(12): 3610 - 3616 (in Chinese)
- [4] Chang RY, Jin TT, Lü YH, et al. Soil carbon and nitrogen changes following afforestation of marginal cropland across a precipitation gradient in Loess Plateau of China. *PloS One*, 2014, **9**(1): e85426
- [5] Deng L, Shangguan ZP, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 7039
- [6] Wang Z, Liu GB, Xu MX, et al. Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China. *Catena*, 2012, **99**: 26 - 33
- [7] Berthrong ST, Plneiro G, Jobbágy EG, et al. Soil C and N changes with afforestation of grasslands across gradients of precipitation and plantation age. *Ecological Applications*, 2012, **22**: 76 - 86
- [8] Zhou T (周涛), Shi P-J (史培军). Indirect impacts of land use change on soil organic carbon change in China. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2006, **21**(2): 138 - 143 (in Chinese)
- [9] Shi SW, Zhang W, Zhang P, et al. A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils. *Forest Ecology and Management*, 2013, **296**: 53 - 63
- [10] Xu M-Y (徐敏云), Li P-G (李培广), Xie F (谢帆), et al. Response of soil organic carbon density to land-use types and management practices change in

- agro-pastoral zone. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27** (7): 320–325 (in Chinese)
- [11] Sun W-Y (孙文义), Guo S-L (郭胜利), Song X-Y (宋小燕). Effects of topographies and land use on spatial distribution of surface soil organic carbon in hilly region of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2010, **25** (3): 443–453 (in Chinese)
- [12] Zhang Y (张勇), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升), *et al.* Factors affecting variation of soil organic carbon density in Yunnan-Guizhou-Guangxi region. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2009, **46** (3): 526–531 (in Chinese)
- [13] Liu MY, Chang QR, Qi YB, *et al.* Aggregation and soil organic carbon fractions under different land uses on the tableland of the Loess Plateau of China. *Catena*, 2014, **115**: 19–28
- [14] Zhang C, Liu GB, Xue S, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **54**: 16–24
- [15] Raiesi F. Soil properties and C dynamics in abandoned and cultivated farmlands in a semi-arid ecosystem. *Plant and Soil*, 2012, **351**: 161–175
- [16] Wang SQ, Huang M, Shao XM, *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon in China. *Environmental Management*, 2004, **33**: S200–S209
- [17] Liu W (刘伟), Cheng J-M (程积民), Gao Y (高阳), *et al.* Distribution of soil organic carbon in grassland on the Loess Plateau and its influencing factors. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2012, **49** (1): 68–76 (in Chinese)
- [18] Wu X-G (武小钢), Guo J-P (郭晋平), Yang X-Y (杨秀云), *et al.* Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31** (11): 3009–3019 (in Chinese)
- [19] Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, **10**: 423–436
- [20] Batjes N, Dijkshoorn J. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma*, 1999, **89**: 273–286
- [21] Fang X, Xue ZJ, Li BC, *et al.* Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2012, **88**: 6–13
- [22] Zhang LH, Xie ZK, Zhao RF, *et al.* The impact of land use change on soil organic carbon and labile organic carbon stocks in the Longzhong region of Loess Plateau. *Journal of Arid Land*, 2012, **4**: 241–250
- [23] Han X-H (韩新辉), Tong X-G (佟小刚), Yang G-H (杨改河), *et al.* Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28** (12): 223–229 (in Chinese)
- [24] Li Z-W (李忠武), Guo W (郭旺), Wang X-Y (王晓燕), *et al.* Effects of land use type on the distribution of organic carbon in different sized soil particles and its relationships to herb biomass in hilly red soil region of South China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23** (4): 867–874 (in Chinese)
- [25] Kirschbaum MU, Guo LB, Gifford RM. Why does rainfall affect the trend in soil carbon after converting pastures to forests? A possible explanation based on nitrogen dynamics. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**: 2990–3000
- [26] Vinton MA, Burke IC. Contingent effects of plant species on soils along a regional moisture gradient in the Great Plains. *Oecologia*, 1997, **110**: 393–402
- [27] Liu ZP, Shao MA, Wang YQ. Large-scale spatial variability and distribution of soil organic carbon across the entire Loess Plateau, China. *Soil Research*, 2012, **50**: 114–124
- [28] Zhan CL, Cao JJ, Han YM, *et al.* Spatial distributions and sequestrations of organic carbon and black carbon in soils from the Chinese loess plateau. *Science of the Total Environment*, 2013, **465**: 255–266
- [29] Stockmann U, Adams MA, Crawford JW, *et al.* The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **164**: 80–99

作者简介 孙龙男, 1988年生, 博士研究生. 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究. E-mail: sunlong1@gmail.com

责任编辑 杨弘

孙龙, 张光辉, 栾莉莉, 等. 黄土丘陵区表层土壤有机碳沿降水梯度的分布. *应用生态学报*, 2016, **27** (2): 532–538

Sun L, Zhang G-H, Luan L-L, *et al.* Distribution of soil organic carbon in surface soil along a precipitation gradient in loess hilly area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27** (2): 532–538 (in Chinese)