

黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素*

刘伟^{1,2} 程积民^{1†} 高阳³ 程杰³ 梁万鹏³

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 以黄土高原水平方向的 4 种主要草地类型为研究对象, 分析了不同草地类型土壤有机碳 (SOC) 的分布特征及其影响因素。结果表明: 土壤有机碳含量随土壤深度的增加而降低, 其中 0~20 cm 土壤有机碳含量与 20~40、40~60、60~80、80~100 cm 有机碳含量差异显著。4 种草地类型土壤有机碳含量分布规律: 0~40 cm 为高山草甸草原 > 典型草原 > 森林草原 > 荒漠草原, 40~100 cm 为高山草甸草原 > 森林草原 > 典型草原 > 荒漠草原; 4 种草地类型中各土层土壤有机碳含量最高的是高寒草甸, 其空间变异最大, 最小的是荒漠草原, 其变异最小。黄土高原上高寒草甸草原、森林草原、典型草原土壤有机碳均集中分布在浅表层 0~40 cm, 分别占 0~100 cm 的 71%、50%、46%, 而荒漠草原各层分布较均匀; 黄土高原土壤有机碳含量与海拔高度呈显著正相关 ($p < 0.01$); 0~40 cm 土壤有机碳含量与土壤含水量呈显著正相关 ($p < 0.01$); 与全氮有极显著的正相关性, 相关系数达 0.984 3; 与年均温呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 几种草地类型 100 cm 深土壤有机碳含量与年降水量无明显相关。

关键词 黄土高原; 草地; 土壤; 有机碳; 分布特征; 影响因素

中图分类号 S812.2; S153.6

文献标识码 A

草地生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分, 在全球碳循环中起着极为重要的作用。草地面积占全球陆地总面积的 16.4%, 碳储量为 308 Pg, 约占全球总碳储量的 15.2%^[1]。据统计, 中国草地面积约为 $331 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总碳库 1.15 Pg C, 是我国陆地最大的生态系统^[2]。草地生态系统中土壤碳储量占草地碳总储量的 92%, 而生物量中碳储量则不到 10%^[3]。由此可见, 草地碳大部分储存在地下, 但是目前的实测数据十分匮乏, 因此研究草地土壤有机碳分布特征对评价草地生态系统碳循环具有十分重要的意义。

土壤有机碳 (SOC) 是土壤中较为活跃的部分, 土壤有机碳在土壤生产力和全球碳循环中起着十分重要的作用^[4]。国内外对陆地生态系统碳储量及动态变化的研究多集中在森林范围内, 而对草地碳储量的研究很少^[5], 因此草原的碳源、碳汇功能问题仍是目前国际上争论的热点^[6-7]。对黄土高原天然草地这一特殊植被类型研究的报道更少。本

文以黄土高原天然草地为研究对象, 研究了黄土高原 4 种草地类型 100 cm 深度土壤有机碳分布规律, 比较了黄土高原几种类型天然草地土壤有机碳分布特征以及与环境因子和土壤特性的关系, 为黄土高原碳循环以及天然草地在全球气候变化中的贡献提供初步依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原西起日月山, 东至太行山, 南靠秦岭, 北抵长城, 涉及青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南 7 省 (区) 50 个地 (盟、州) 市, 287 个县 (旗、市、区), 全区总面积 64 万 km^2 。年平均气温变化在 3.6~14.3 °C 之间, 年均降水量变化在 184.8~750.0 mm 之间, 温度和降水量呈现出由东南向西北递减的趋势^[8]。

本研究区域 (35° 03.821' ~ 37° 38.102' N,

* 中国科学院战略性先导科技专项——应对气候变化的碳收支认证及相关问题 (XDA05050202)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目 (10502-Z8)、中国科学院重要方向项目 (KZCX2-YW-441、KZCX2-YW-149)、国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2007CB106803) 资助

† 通讯作者, E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 刘伟 (1985—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学。E-mail: lwmax@163.com

收稿日期: 2010-09-06; 收到修改稿日期: 2010-11-27

101°06.521' ~ 111°53.481'E) 囊括了森林草原、典型草原、高寒草甸草原、荒漠草原 4 种主要草原类型,海拔由 287 ~ 3 408 m 不等,跨越半湿润 - 半干旱 - 干旱气候带,年均降水量 185.9 ~ 623.5 mm,年均气温 3.0 ~ 13.5 °C。本研究区域内,森林草原主要分布在陕西南部 and 山西中南部,植被群落主要为白羊草 (*Bothriochloa ischemum*) + 铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*) 群落,典型草原主要分布在山西、陕西和宁夏一带,建群种或优势种是本氏针茅 (*S. bungeana*) 和铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*),高寒草甸草原分布于青海湟中和日月山一带,植被群落为垂穗披碱草 (*Clinelymus nutans*) + 多裂委陵菜 (*Potentilla multifida*) + 细叶苔草 (*Carex duriuscula*)

群落,荒漠草原是草原向荒漠过度的植被类型,分布在宁夏中卫和红寺堡一带,主要优势种有猫头刺 (*Oxytropis aciphylla*)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、茵陈蒿 (*Artemisia capillaris*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法 于 2009 年 9 ~ 10 月对黄土高原天然草地采用水平样带法进行采样,采样点经度上横跨整个黄土高原,从东向西以行政县为单位共采样地 40 个 (图 1)。在同一草地类型中选择气候及环境条件基本一致的草地,以样线法沿着同一坡向调查每一块样地,研究黄土高原不同类型的天然草地有机碳,从空间上采集不同深度的土壤样品,对土壤层的营养元素进行分析和研究。

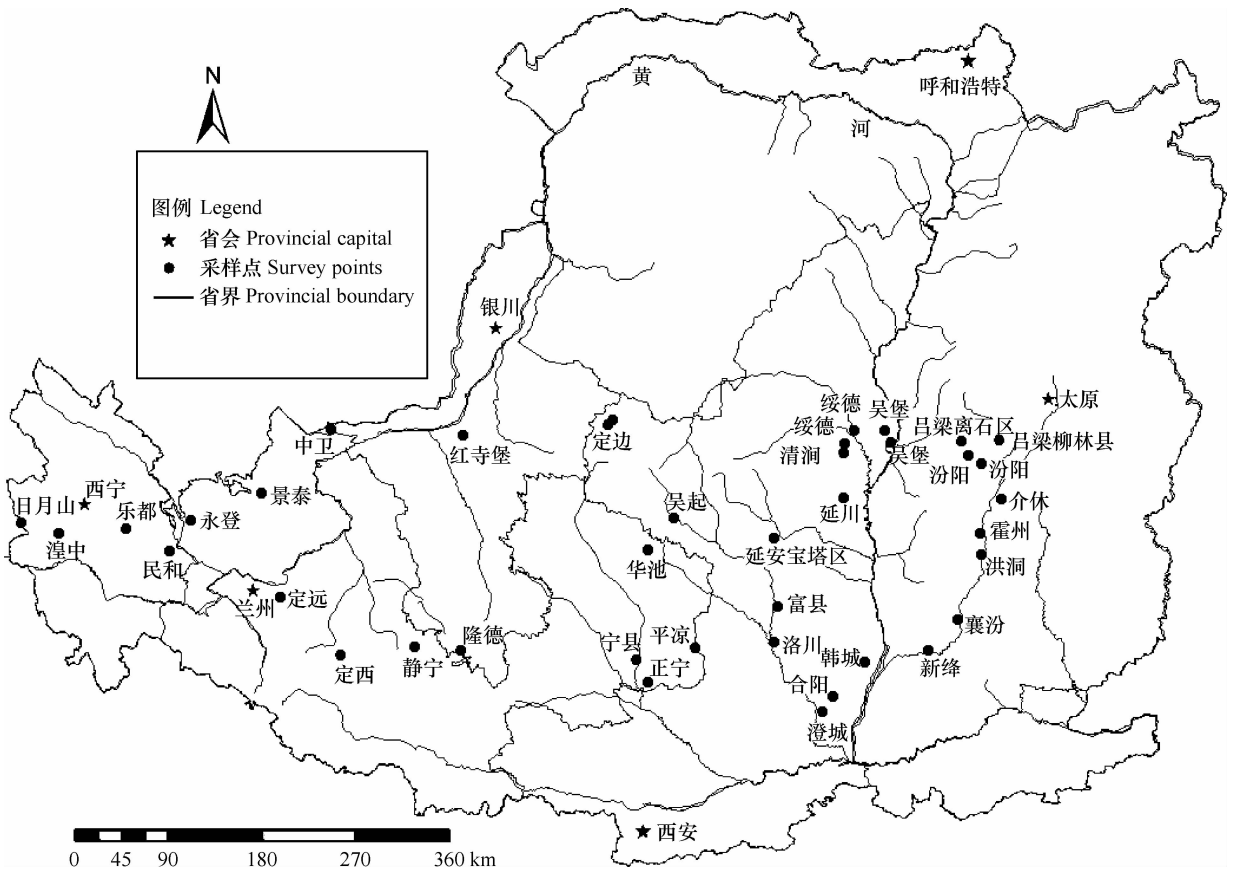


图 1 黄土高原天然草地采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points in the Loess Plateau

环境因子调查: GPS 测定每个样地的高程、经纬度坐标,湿温表测定气温。

植物样调查方法: 采用样线法采样的方法,在每个样地上合理布设 50 m 的样线,等间隔设置 15 个采样点,每个样点上用 50 cm × 50 cm 样方框进行调查,记录主要植被类型。

土样调查方法: 土壤有机碳的研究,一般都是调查 100 cm 深度的有机碳含量^[9-11],在每个样地的 15 个采样点中随机选 3 个样点 (作为重复) 采用土钻法分五层分别采取 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 土样,分别标号装袋,带回实验室分析,每个样地挖一个土壤剖面以测定各层土壤的

容重。

1.2.2 样品处理及室内分析 土壤含水量的测定采用烘干法,即在 $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下土样烘干至恒重,测定 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100$ cm 五层土壤含水量^[12];挑去土壤中的根系及杂物等,然后将土样磨碎通过 0.25 mm (60 目)土壤筛。土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化-外加加热法,全氮测定采用半微量凯氏定氮法^[12]。

1.3 统计分析

数据采用 EXCEL 进行整理及 SAS 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同草地类型土壤有机碳的分布规律

2.1.1 不同草地类型土壤有机碳含量在相同土层的分布特征 由图 2 可以看出,在 $0 \sim 20$ cm 和 $20 \sim 40$ cm 土层,有机碳含量规律为草甸草原 > 典型草原 > 森林草原 > 荒漠草原,在 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100$ cm 土层,有机碳含量为草甸草原 > 森林草原 > 典型草原 > 荒漠草原。高寒草甸草原土壤有机碳明显高于其他 3 种类型草原($p < 0.01$)。

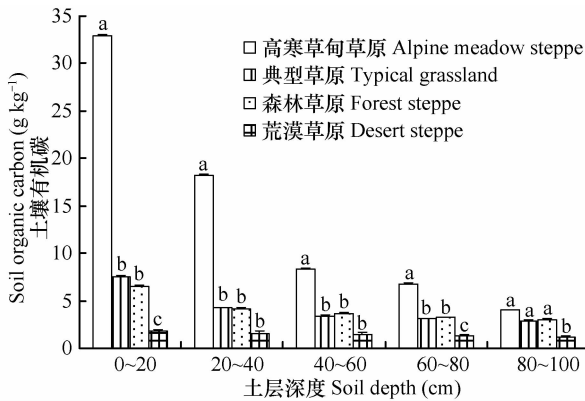


图 2 不同草地类型土壤有机碳垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of soil organic carbon in four types of grasslands

4 种草地类型土壤有机碳均随土层深度的增加而减少,其中高寒草甸草原有机碳变化幅度最大,这说明高寒草甸草原土壤有机碳主要分布于浅表层;而荒漠草原变化幅度最小,说明荒漠草原土壤有机碳在各土层分布较为均匀;森林草原和典型草

原土壤有机碳分布较为一致,主要集中在浅表层,即 $0 \sim 20$ cm 土层,从 40 cm 以下变化缓慢,分布较为均匀。

2.1.2 不同草地类型土壤有机碳在不同土层的分配比例 利用以下公式将每层土壤有机碳含量转化为有机碳密度 SOCD, $\text{SOCD} = C_i \cdot \theta_i \cdot D_i \cdot (1 - \delta_i) / 100$ 。式中, i 为土层; C_i 为第 i 层土壤有机碳的平均含量 (g kg^{-1}); θ_i 为第 i 层土壤容重 (g cm^{-3}); D_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); δ_i 为第 i 层中直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%),根据土壤石质度级别与 δ 的关系,鉴于黄土高原土壤几乎没有粒径大于 2 mm 的砾石,取 δ 值为 0.5% ^[13]。用 SOCD 代替 1 m^2 面积上的各土层有机碳储量,从而计算出该层有机碳储量占 100 cm 土层有机碳储量的比例。

由图 3 可以看出,各个草原类型土壤有机碳储量均随着土层深度的增加而呈递减的趋势,高寒草甸草原 $0 \sim 40$ cm 土层有机碳储量占 $0 \sim 100$ cm 有机碳总储量的 71% ,随着土层深度的增加,其所占总储量的比例快速降低,表明高寒草甸草原土壤有机碳主要分布在浅表层($0 \sim 40$ cm);典型草原浅表层有机碳储量所占比例仅次于高寒草甸草原,约占 $0 \sim 100$ cm 的 50% ,其次为森林草原,约为 46% ;浅表层所占比例最小的是荒漠草原,约为 38% ,表明荒漠草原各土层有机碳所占比例十分均匀,随土层深度的增加变化不明显,介于约 $18\% \sim 22\%$ 之间。

2.1.3 不同草地类型土壤有机碳的空间变异性 由表 1 可以看出,森林草原土壤有机碳含量处于 $1.61 \sim 9.62 \text{ g kg}^{-1}$ 之间, $0 \sim 20$ cm 土层有机碳含量与其他 4 层差异显著,其他 4 层之间无明显差异;典型草原有机碳含量处于 $1.63 \sim 13.02 \text{ g kg}^{-1}$ 之间, $0 \sim 20$ cm 土层有机碳含量与其他 4 层差异也达到显著水平,其他 4 层没有明显差异;高寒草甸草原各土层有机碳含量变化幅度最大,介于 $3.72 \sim 34.40 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,荒漠草原有机碳含量各土层之间波动最小,在 $0.72 \sim 2.42 \text{ g kg}^{-1}$ 之间。4 种草地类型中,典型草原有机碳的变异系数最大,最大可达 50% ,变异系数最小的是高寒草甸草原,最大也不足 14% ;总体上来看,变异系数在 $0 \sim 20$ cm 土层最小, $20 \sim 60$ cm 土层最大, $60 \sim 100$ cm 随土层深度增加而减小。

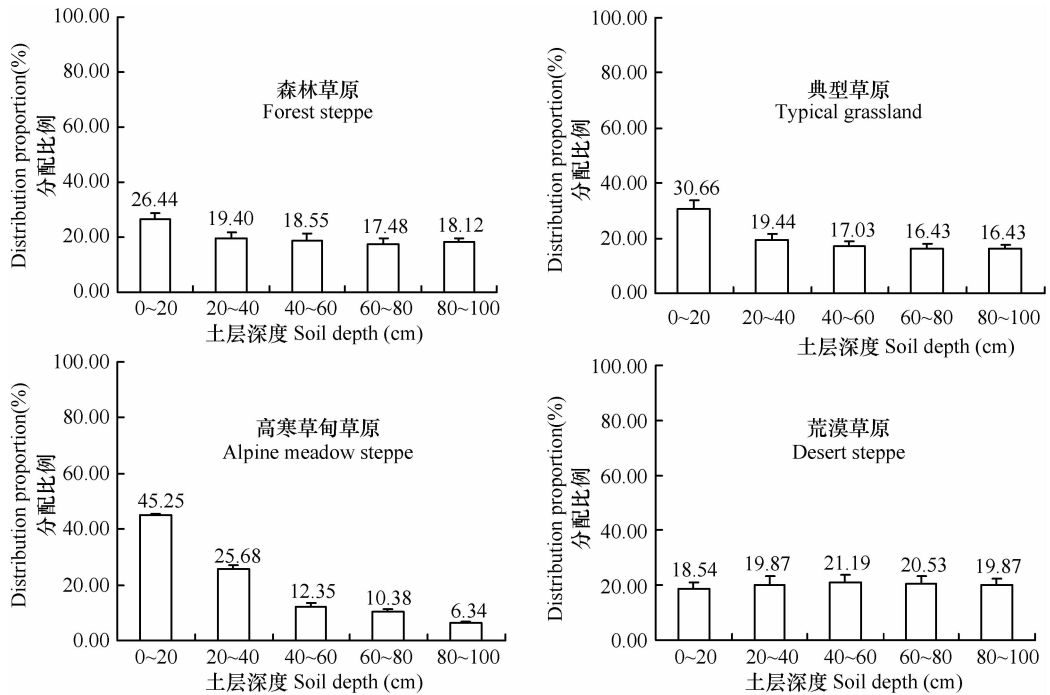


图3 不同草地类型不同土层深度土壤有机碳的分配比例

Fig. 3 Proportion of soil organic carbon distributions in different soil layers of four types of grasslands

表1 不同草地类型不同土层深度土壤有机碳统计分析¹⁾

Table 1 Statistical analysis of distribution of soil organic carbon with depth in the four types of grasslands

草地类型 Grassland type	土层深度 Soil depth (cm)	土壤有机碳 SOC ²⁾ (g kg ⁻¹)	最小值 Min(g kg ⁻¹)	最大值 Max(g kg ⁻¹)	标准差 SD	变异系数 CV (%)
森林草原 Forest steppe	0~20	6.55 ± 0.59a	4.13	9.62	1.88	28.67
	20~40	4.17 ± 0.48b	2.34	6.07	1.51	36.34
	40~60	3.67 ± 0.51b	1.86	6.03	1.60	43.73
	60~80	3.20 ± 0.39b	1.71	5.32	1.22	38.24
	80~100	3.03 ± 0.29b	1.61	4.19	0.90	29.88
典型草原 Typical grassland	0~20	7.55 ± 0.75a	3.04	13.02	3.25	43.03
	20~40	4.24 ± 0.48b	1.94	8.64	2.10	49.68
	40~60	3.44 ± 0.38b	1.59	6.89	1.66	48.29
	60~80	3.07 ± 0.32b	1.70	6.65	1.39	45.27
	80~100	2.88 ± 0.23b	1.63	5.14	1.02	35.48
高寒草甸草原 Alpine meadow	0~20	32.96 ± 1.44a	31.52	34.40	2.04	6.18
	20~40	18.26 ± 1.69b	16.57	19.94	2.38	13.05
	40~60	8.29 ± 0.81c	7.48	9.10	1.15	13.82
	60~80	6.74 ± 0.63cd	6.11	7.37	0.89	13.22
	80~100	3.99 ± 0.27d	3.72	4.26	0.38	9.57
荒漠草原 Desert steppe	0~20	1.79 ± 0.27a	1.13	2.42	0.53	29.83
	20~40	1.62 ± 0.31a	0.95	2.46	0.63	38.77
	40~60	1.47 ± 0.25a	0.91	2.10	0.50	33.77
	60~80	1.30 ± 0.21a	0.82	1.82	0.42	32.11
	80~100	1.16 ± 0.17a	0.72	1.54	0.35	30.11

注: 1) 总样地数为40(森林草原10个样地、典型草原20个样地、荒漠草原6个样地、高寒草甸4个样地); 2) 平均值 ± 标准误, 同一类型下字母不同表示差异显著($p < 0.01$)。Note: 1) A total of 40 plots (including 10 plots of forest steppe, 20 plots of typical grassland, 6 plots of desert steppe and 4 plots of alpine meadow). 2) Average ± SE, different letters mean significant difference in the same type ($p < 0.01$)

2.2 土壤有机碳含量的影响因素

2.2.1 土壤有机碳与海拔之间的关系 表 2 显示,样地各层土壤有机碳含量均随海拔高度的增加而增加,相关分析表明,5 层土壤有机碳与海拔均呈显著正相关($p < 0.01$)。由相关系数很明显看出,20~40 cm 土壤有机碳含量与海拔高度的相关性最大,其次为 40~60、60~80、0~20、80~100 cm,其相关性均达到极显著水平。因海拔升高,气温下降,有机质分解速度变缓,有机碳积累较多,土壤有机碳向深层土壤迁移的速度减慢,所以越往下层土壤有机碳含量受海拔因素的影响越小。

2.2.2 土壤有机碳与土壤水分之间的关系 由图 4 可以看出,0~20 cm 和 20~40 cm 有机碳含量与土壤含水量呈显著正相关,相关系数 r 分别为 0.733 6 和 0.640 0($p < 0.01$),0~20 cm 和 20~40

cm 土壤含水量多集中在 5% 到 20% 之间,由于草原植物根系主要分布在 0~40 cm 土壤浅表层,水分条件影响着根系生物量,根系中有机物又是土壤有机碳的重要来源,因此在土壤浅表层 0~40 cm,土壤有机碳含量与土壤含水量呈现显著正相关。

表 2 不同土层深度土壤有机碳与海拔的关系

Table 2 Relationship between soil organic carbon and elevation in different soil layers

土层 Soil depth (cm)	回归方程 Regression equation	相关系数 r Correlation coefficient
0~20	$y = 0.0063x - 0.1427$	0.6658
20~40	$y = 0.0041x - 0.5579$	0.7744
40~60	$y = 0.0021x + 0.9804$	0.7119
60~80	$y = 0.0016x + 1.1474$	0.6714
80~100	$y = 0.0008x + 1.8944$	0.4750

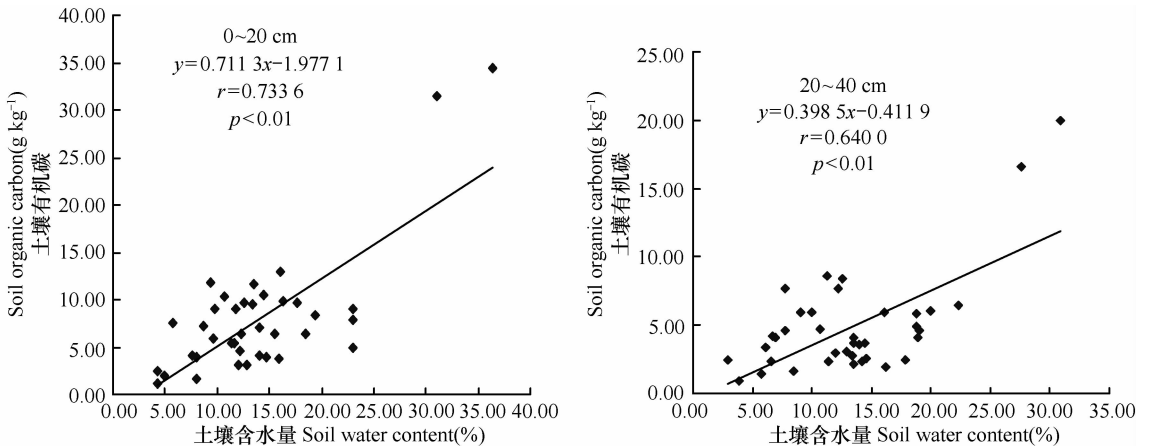


图 4 土壤有机碳含量与土壤含水量的关系

Fig. 4 Relationship between soil organic carbon and soil water content

在 40~100 cm 土层中,有机碳与土壤含水量之间基本上没有相关性,因为随着土壤深度的增加,植物根系含量越来越少,水分对作为土壤有机碳来源的根系的影响也越来越小,所以随着土壤深度的增加,土壤有机碳含量与土壤含水量之间的相关性也越来越小,最底层 80~100 cm 土壤有机碳含量与土壤含水量基本没有相关性。

2.2.3 土壤有机碳与主要气候因子的关系

由图 5 可以看出,研究区降水量多在 450~600 mm 之间。图中两个离散的点为高寒草甸草原,其降水量与其他草原类型差别不大,处于 400~

500 mm 之间,但其土壤有机碳含量显著高于其他草原类型。年均温多集中在 8~10℃,图中两个极端低温同样是高寒草甸草原,气温温度低,有机碳积累多。通过对 0~100 cm 土层土壤有机碳与年降水和年均温的相关性进行分析,结果表明黄土高原天然草地 0~100 cm 土层土壤有机碳平均含量与年降水量没有相关性,与年均温呈显著负相关,即有机碳含量随着年均温的增加而减少。这表明年均温是影响黄土高原土壤有机碳含量的关键气候因子,而年降水量对土壤有机碳的积累没有影响。

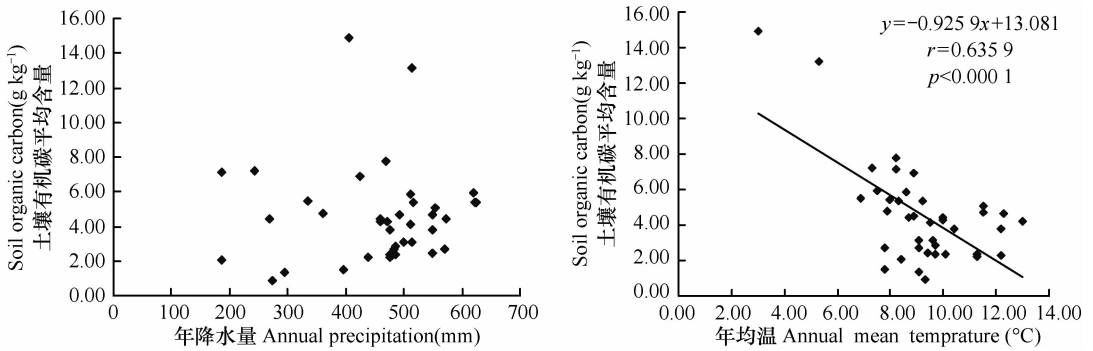


图 5 0 ~ 100 cm 土层土壤有机碳含量与年降水量和年均温的关系

Fig. 5 Relationship between soil organic carbon and annual precipitation and annual mean temperature

2.2.4 土壤有机碳与土壤全氮之间的关系 分析结果表明:土壤有机碳(SOC)与全氮(TN)的相关系数为 0.984 3,相关性达到极显著水平($p < 0.01$)。所得到的土壤有机碳关于全氮的回归方程是 $SOC = 10.86689 TN - 0.33242$, $r = 0.9843$ 。

3 讨论

在草原生态系统中,植被类型以草本和灌木为主,根系主要分布在 0 ~ 30 cm 的土壤浅表层^[14],腐殖质都集中在这一层,因此在土壤浅表层有机碳积累较多。土壤有机碳库的变化主要受初级生产量的输入过程与分解过程的制约,黄土高原 4 种草地类型土壤剖面的有机碳含量均随深度增加而减少,因土壤表层植物凋落物多,有机质积累量大,植物根系也大多分布在浅表层,随着土层深度的增加,植物根系分布减少,有机质来源少,故而呈现出有机碳随土层深度的增加而递减的趋势,这与前人大部分研究结果相一致^[14-16]。

高寒草甸草原土壤有机碳明显高于其他 3 种草原类型($p < 0.01$),这与 Wei 等^[17]对长白山高山冻原生态系统土壤碳和养分储量的空间分布格局的研究结论一致。因为高寒草甸草原海拔高,气温低,土壤温度低,土壤有机质矿化速度慢^[18-19],土壤中有机碳积累较多。在土壤浅表层(0 ~ 40 cm),典型草原的有机碳含量要高于森林草原和荒漠草原,因典型草原地上植被生物量大,地面枯枝落叶层厚,土壤的浅表层根系生物量大,年积累的腐殖质较多,因而有机碳含量要高于其他两种草原;荒漠草原降水量小是限制地面植被生长的主要原因,其土壤类型主要是沙土,有机质的含量最低。在 40 ~ 100 cm 深层土壤,森林草原有机碳含量要高于典型

草原和荒漠草原,因为森林草原植物根系分布较深,土壤深层有机碳来源较多,积累也多。

高寒草甸草原、典型草原、森林草原土壤有机碳主要分布在浅表层,荒漠草原各土层有机碳所占比例十分均匀,表明荒漠草原有机碳含量随土层深度的增加变化不明显,由于荒漠草原植物地下生物量在各土层分布均匀,水分是荒漠草原植被生长的最大限制因素,荒漠草原降水量少,土壤地下水位低,各层的土壤含水量普遍较少,植物根系在土壤不同深度的分布较为均匀,所以土壤各层有机碳积累量变幅较小。这一研究结果与王艳芬等^[20]对我国内蒙古锡林郭勒地区的研究和傅华等^[16]对阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素研究的结论相一致。

黄土高原天然草地各层土壤有机碳均随海拔的增加而增加。本实验研究表明 0 ~ 100 cm 土壤有机碳含量与海拔高度的相关性达到极显著水平,原因是海拔增加,气温下降,有机质分解变慢,有机碳积累增加。这与傅华等^[21]研究结论一致。

一般地上枯落物、植物地上地下物质分配、根系深度和根生物量等都将影响土壤有机碳输入的模式、速度、质量和数量^[22]。黄土高原天然草地 0 ~ 40 cm 浅表层土壤有机碳与土壤含水量之间呈极显著正相关。因为一方面地上植被和根系生物量随着土壤含水量的增加而增多,另一方面枯落物和根系分解速率也随着土壤含水量的增加而加快^[23],因为地上枯落物和草本植物根系是土壤浅表层有机碳主要输入来源,枯枝落叶在分解过程中向浅表层土壤输送有机碳,所以土壤浅表层有机碳与含水量之间呈显著正相关。Nepstad^[24]和 Trumbore^[25]等指出植物根系是深层土壤有机碳的主要来源,控制着深层土壤有机碳的循环和分布。由于草原植物根

系主要分布在土壤浅表层,40 cm 以下深层土壤有机碳主要由浅表层迁移而来,因此黄土高原天然草地深层土壤有机碳与土壤含水量的相关性不明显。

在气候因子方面,黄土高原天然草地土壤有机碳含量与年降水量没有关系;而有机碳含量与年均温呈显著负相关,因为土壤温度与空气温度密切相关,气温越低,土壤温度也越低,作为土壤有机碳源的地上枯落物分解变慢^[23],土壤得到源源不断的有机碳补给,但土壤有机碳矿化速率随着土壤温度的降低而下降^[26],在长时间尺度上,有机碳源没有减少,而有机碳的矿化却随着温度的降低而变慢,因此土壤有机碳与年均温呈负相关关系。

黄土高原土壤有机碳与全氮呈极显著正相关,即土壤的 C/N 具有相对的稳定性,这一研究结果与魏晶等^[27]对长白山北坡高山冻原土壤碳含量与土壤全氮和土壤全磷含量呈正相关关系研究、王其兵等^[28]对内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳与氮素的空间分布具有显著的相关性结论、李明峰等^[29]对草原土壤的碳氮分布与 CO₂ 排放通量的相关性分析结论一致。但与高安社等^[30]对不同草原类型土壤有机碳和全氮的差异研究,典型草原与荒漠草原 SOC 与 TN 之间呈弱相关结论不一致。

4 结 论

1) 黄土高原土壤有机碳含量随土壤深度的增加而降低,其中 0~20 cm 与 20~40、40~60、60~80、80~100 cm 有机碳含量差异显著。4 种草地类型中,各土层土壤有机碳含量最高的是高寒草甸,其空间变异最大,最小的是荒漠草原,其变异最小。

2) 黄土高原各类型草原中,0~40 cm 土壤有机碳含量为高山草甸草原>典型草原>森林草原>荒漠草原,40~100 cm 为高山草甸草原>森林草原>典型草原>荒漠草原。

3) 黄土高原上高寒草甸草原、森林草原、典型草原土壤有机碳均集中在浅表层 0~40 cm,分别占 0~100 cm 的 71%、50%、46%,而荒漠草原各层分布较均匀。

4) 黄土高原土壤有机碳含量与海拔高度呈显著正相关,与年降雨量无关,与年均温呈显著负相关,和全氮有极显著的正相关性,相关系数达 0.98;在 0~40 cm 土壤浅表层有机碳含量与土壤含水量呈显著正相关,而 40~100 cm 土层有机碳含量与土壤含水量没有相关性。

参 考 文 献

- [1] 石锋,李玉娥,高清竹,等. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响. 草业科学, 2009, 26(3): 9—15. Shi F, Li Y E, Gao Q Z, et al. Effects of managements on soil organic carbon of grassland in China (In Chinese). Pratacultural Science, 2009, 26(3): 9—15
- [2] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804—812. Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimate the terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000 (In Chinese). Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(6): 804—812
- [3] Houghton R A. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850// Lai R, Kimble J, Levine E, et al. Soils and global change. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc, 1995: 45—65
- [4] Post W M, Peng T H, Emmanuel W R, et al. The global carbon cycle. American Scientist, 1990, 78: 310—326
- [5] Hall D O, Ojima D S, Parton W J, et al. Response of temperate and tropical grasslands to CO₂ and climate change. Journal of Biogeography, 1995, 22: 537—547
- [6] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. Science China: Life Sciences, 2010, 53(7): 757—765
- [7] 朴世龙,方精云,贺金生,等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491—498. Piao S L, Fang J Y, He J S, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China (In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4): 491—498
- [8] 程积民,万惠娥. 黄土高原植被建设与水土保持. 北京: 中国林业出版社, 2002: 3—9. Cheng J M, Wan H E. Vegetation constructions and soil and water conservation in the Loess Plateau in China (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2002: 3—9
- [9] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and life zones. Nature, 1982, 298: 156—159
- [10] Sombroek W G, Nachtergaele F O, Hebel A. Amount, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. Ambio, 1993, 22(7): 417—426
- [11] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. Tellus, 1995, 47(B): 310—319
- [12] 刘光焱. 土壤理化分析与剖面描述. 中国标准出版社, 1996. Liu G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1996
- [13] 姚贤良,程云生. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1986. Yao X L, Cheng Y S. Soil physics (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [14] 李明峰,董云社,耿元波,等. 草原土壤的碳氮分布与 CO₂ 排放通量的相关性分析. 环境科学, 2004, 25(2): 7—11. Li M F, Dong Y S, Geng Y B, et al. Analyses of the correlation between the fluxes of CO₂ and the distribution C & N in grassland soils (In Chinese). Environmental Science, 2004, 25(2):

7—11

- [15] Lavado R S, Sierra J O, Hashimoto P N. Impact of grazing on soil nutrients in a Pampean grassland. *Journal of Range Management*, 1996, 49(5): 452—457
- [16] Ojima D S. Workshop summary statement: Terrestrial biospheric carbon fluxes—Quantification of sinks and sources of CO₂. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, 70: 3—15
- [17] Wei J, Wu G, Deng H B, et al. Spatial pattern of soil carbon and nutrient storage at the Alpine tundra ecosystem of Changbai Mountain, China. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(4): 249—254
- [18] 张勇, 史学正, 于东升, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究. *土壤学报*, 2009, 46(3): 526—531. Zhang Y, Shi X Z, Yu D S, et al. Factors affecting variation of soil organic carbon density in Yunnan-Guizhou-Guangxi region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 526—531
- [19] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布. *土壤学报*, 2008, 45(5): 933—942. Tian Y Q, Ouyang H, Xu X L, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and density on the Qinghai-Tibet plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 933—942
- [20] 王艳芬, 陈佐忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响. *植物生态学报*, 1998, 22(6): 545—551. Wang Y F, Chen Z Z. Distribution of organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 545—551
- [21] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2004, 24(3): 469—476. Fu H, Chen Y M, Wang Y R, et al. Organic carbon content in major grassland types in Alex, Inner Mongolia (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 469—476
- [22] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle; Implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 1998, 280: 1 393—1 394
- [23] 程积民, 万惠娥, 胡相明, 等. 半干旱区封禁草地凋落物的积累与分解. *生态学报*, 2006, 26(4): 1 207—1 212. Cheng J M, Wan H E, Hu X M, et al. Accumulation and decomposition of litter in the semiarid enclosed grassland (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1 207—1 212
- [24] Nepstad D C, de Carvalho C R, Davidson E A, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, 1994, 372: 666—669
- [25] Trumbore S E, Davidson E A, Decamargo P B, et al. Below-ground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 515—528
- [26] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 155—165
- [27] 魏晶, 邓红兵, 吴钢, 等. 长白山北坡高山冻原土壤碳和养分的分布特征. *土壤通报*, 2005, 36(6): 840—845. Wei J, Deng H B, Wu G, et al. The distribution of soil carbon and nutrients in alpine tundra ecosystem on the northern slope of Changbai Mountains (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 840—845
- [28] 王其兵, 李凌浩, 刘先华, 等. 内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析. *植物生态学报*, 1998, 22(5): 409—414. Wang Q B, Li L H, Liu X H, et al. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen in an Xilin river basin grassland, Inner Mongolia (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(5): 409—414
- [29] 李明峰, 董云社, 耿元波, 等. 草原土壤的碳氮分布与 CO₂ 排放通量的相关性分析. *环境科学*, 2004, 25(2): 7—11. Li M F, Dong Y S, Geng Y B, et al. Analyses of the correlation between the fluxes of CO₂ and the distribution of C&N in grassland soil (In Chinese). *Environmental Science*, 2004, 25(2): 7—11
- [30] 高安社, 郑淑华, 赵萌萌, 等. 不同草原类型土壤有机碳和全氮的差异. *中国草地*, 2005, 27(6): 44—48. Gao A S, Zheng S H, Zhao M L, et al. Soil organic carbon and total nitrogen content in different steppes (In Chinese). *Grassland of China*, 2005, 27(6): 44—48

DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON IN GRASSLAND ON LOESS PLATEAU AND ITS INFLUENCING FACTORS

Liu Wei^{1,2} Cheng Jimin^{1†} Gao Yang³ Cheng Jie³ Liang Wanpeng³

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 College of Animal Science and Technology, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Distribution of soil organic carbon (SOC) and its affecting factors in four different types of natural grasslands (forest steppe, typical grassland, alpine meadow steppe and desert steppe) in the Loess Plateau were analyzed. Results show that content of soil organic carbon decreases with soil depth, and is significantly higher in 0 ~ 20 cm than in 20 ~ 40 cm, 40 ~ 60 cm, 60 ~ 80 cm and 80 ~ 100 cm. In the 0 ~ 40 cm soil layer, the distribution of organic car-

bon content in the four types of grasslands tends to be in the order of Alpine meadow steppe > typical grassland > forest steppe > desert steppe; while in the 40 ~ 100 cm soil layer, in the order of Alpine meadow steppe > forest steppe > typical grassland > desert steppe. In the Alpine meadow steppe, forest steppe and typical steppe of the Loess Plateau, soil organic carbon is concentrated in the surface layer (0 ~ 40 cm), accounting for 71%, 50% and 46% of the total in the profile (0 ~ 100 cm), while the distribution is more uniform in the desert steppe; Soil organic carbon content is positively related ($p < 0.01$) to altitude; in the 0 ~ 40 cm soil layer, to soil water content ($p < 0.01$); and to total nitrogen ($r = 0.9843$); but negatively related to annual mean temperature ($p < 0.01$). Moreover, it has no obvious relationship with annual precipitation in the 100 cm soil layer in all the four types of grasslands.

Key words Loess Plateau; Grassland; Soil; Organic carbon; Distribution; Influencing factors