

祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素

何志斌, 赵文智, 刘 鹤, 苏永中

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 临泽内陆河流域综合研究站, 流域水文及应用生态实验室, 兰州, 730000)

摘要:以祁连山青海云杉林斑为研究对象, 调查获得林斑的水文、土壤、植被数据, 分析了表层(0~20cm)土壤有机碳特征及其与地形、植被和土壤特性的关系。结果表明:青海云杉林斑表层土壤有机碳含量的平均值为 (84.9 ± 26.7) g/kg, 变异系数 31.5%。有机碳含量与土壤含水量、海拔、土壤容重和灌木生物量呈显著正相关关系, 而与林木郁闭度呈显著负相关关系。此外, 人工采伐形成的林窗斑块(面积 0.02~0.12 hm²)和半阴坡小斑块林地(面积 0.17~0.89hm²), 其斑块面积大小并未明显影响土壤有机碳含量的变化。经主成分分析表明, 海拔和土壤含水量是影响土壤有机碳含量的第一主成分, 林木郁闭度是第二主成分, 灌木生物量是第三主成分, 累计解释率为 83.8%。

关键词:祁连山; 土壤有机碳; 斑块; 青海云杉林

文章编号:1000-0933(2006)08-2572-06 中图分类号:S718 文献标识码:A

Characteristic of *Picea crassifolia* forest soil organic carbon and relationship with environment factors in the Qilian Mountain

HE Zhi-Bin, ZHAO Wen-Zhi, LIU Hu, SU Yong-Zhong (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Laboratory of Basin Hydrology and Applied Ecology, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2572~2577.

Abstract: Soil organic carbon, the main part of terrestrial carbon pool, plays an important role in terrestrial carbon cycle, and is one of the most important components in the research of global change. This paper aims to analyze soil organic carbon content (SOC) distribution patterns of the *Picea crassifolia* forest patches in Qilian Mountain and to determine which factors affect those patterns. We have investigated the relationships between edaphic environmental factors (soil, forest floor, topography, and canopy) and understory vegetation (composition and biomass) among 67 plots representing four major patch types which include: (1) big forest patch in the shady slope; (2) small forest patches in the semi-shady slope; (3) forest gaps; and (4) grassland in the sunny slope. The area of each plot is 10m × 10m, and the data of elevation, slope grade, plant cover, biomass, canopy density and diameter at breast height of *Picea crassifolia* in the each plot have been estimated. Soil samples have been taken and analyzed in the laboratory for SOC content, nitrogen, moisture, and bulk density. The results indicate that the average SOC content is (84.9 ± 26.7) g/kg in the surface layer (0—20cm depth) of soil under *Picea crassifolia* forest patches. The SOC content is significantly greater under shade forest patch ((101.6 ± 31.8) g/kg) compared to the semi-shade forest patches ((64.2 ± 10.3) g/kg) and sunny slope grassland ((23.2 ± 5.6) g/kg). Correlation analysis shows that SOC content is positively correlated with elevation, soil water content, soil bulk density and shrub biomass, and negatively correlated with canopy density of *Picea crassifolia* forest; the patch areas of forest gaps (0.02—0.12hm²) and smaller forest patches (0.17—0.89hm²) in the semi-shady slope have not significant effect on SOC content. Further principal component analysis shows that elevation and soil

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40471083);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新资助项目(2004110)

收稿日期:2005-05-15; **修订日期:**2005-10-30

作者简介:何志斌(1977~),男,宁夏固原人,博士生,主要从事生态水文学研究. E-mail: hzbmail@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471083) and Knowledge Innovation Project of Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS (No. 2004110)

Received date: 2005-05-15; **Accepted date:** 2005-10-30

Biography: HE Zhi-Bin, Ph. D. candidate, mainly engaged in eco-hydrology. E-mail: hzbmail@ns.lzb.ac.cn

water content are the first principal component affecting SOC content, followed by the canopy density of *Picea crassifolia* forest and shrub biomass, which account for 83.8% of the variance of SOC content.

Key words: soil organic carbon; patch; *Picea crassifolia* forest; Qilian Mountain

生态系统中的碳循环是一个动态平衡过程,主要受到气候、植被、土壤有机质的分解和矿化、干扰等因素的影响^[1]。近年来,CO₂ 排放量升高而影响全球气候变化引起了许多科学家对陆地生态系统中碳平衡以及碳存储和分布的关注。在全球尺度上研究表明,土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库^[2,3],土壤、植被和大气所储存的碳量分别为(1750 ± 250) PgC, (550 ± 100) PgC 和 760PgC(1PgC = 10¹⁵ gC)^[4]。因此,土壤有机碳的分布及其转化日益成为全球有机碳循环研究的热点^[6,7],并且对预测气候变化具有重要的意义。

干旱山区森林斑块形成后,有助于土壤有机碳在斑块内聚集,即植被丛的“肥岛”,它既是植被作用的结果,又促进植被斑块格局的形成^[8,9]。因此,斑块内土壤有机碳研究对于干旱山区森林抚育管理有重要意义。另外,表层土壤有机碳直接影响到土壤肥力和植被生产力。因此,本文以祁连山斑块云杉林为研究对象,分析林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中段(100°17'E、38°24'N) 甘肃省肃南县西水林区的排露沟流域,流域总面积 2.95km²,长 4.25km,纵坡比降 1:4.19;海拔 2600 ~ 3800m。该流域阳坡为山地干草原,阴坡为斑块森林景观,森林总面积 1.18km²,覆盖率 40.1%。年均气温 -0.6 ~ 2.0℃,7 月份平均气温 10 ~ 14℃,年降水量 435.5mm,蒸发量 1051.7mm,年日照时数 1892.6h,年平均相对湿度为 60%。植被因地形和气候的差异而形成明显的垂直分布带。以青海云杉林(*Picea crassifolia*)为主的建群种呈斑块状分布于阴坡、半阴坡,灌木主要以金露梅(*Potentilla fruticosa* Linn.)、银露梅(*Potentilla glabra* Lodd.)、高山柳(*Salix cupularis* Rehd.)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum* (Linn.) Wahl.)等为建群种,林下植被主要以苔藓、珠芽蓼(*Polygonum viviparum* Linn.)、木贼(*Ephedra equisetina* Bunge)等为主。土壤主要是山地灰褐土和亚高山灌丛草甸土,土层较薄,以粉沙块为主,成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色沙页岩等,pH 值 7.0 ~ 8.0。

1.2 采样方法

2004 年 7 ~ 8 月份,在祁连山中段西水森林保护区的排露沟流域共调查了 10 块青海云杉林斑,其中 1 块面积较大的林斑位于阴坡,占整个流域林斑面积的 50% 以上。沿林斑上线边缘外的灌木群落、林斑上线边缘、林中上线、林中下线、林斑下线边缘和林斑下边缘外的灌木群落布设 6 条调查样线,每条样线设有 5 个样地(图 1A),而其余的 9 块小林斑处于半阴坡(图 1B),在每个小林斑内,沿林斑上边线、林斑中心和林斑下边线共设 3 个样地。作为对照,在阴坡林斑内的林窗和阳坡草地各设有 5 个样地,即整个研究区共设 67 块样地。每块样地面积为 10m × 10m,调查样地内的每棵乔木高度、胸径、样地林木郁闭度和灌木种类、平均高度、盖度和生物量。此外,在样地内呈梅花状布设 5 个 1m × 1m 小样方,调查草本物种数、平均高度、平均盖度和生物量;苔藓的盖度、高度和生物量。采集样地内 0 ~ 20cm 土样,3 个重复,带回实验室分析测定土壤有机碳、全 N 以及容重。土壤含水量和剖面厚度是用土钻取样,20cm 取一次样,直到岩石层。

1.3 样品处理及数据分析

土壤有机碳的测定采用重铬酸钾容量法,土壤全氮采用半微量开氏法(K₂SO₄-CuSO₄-Se 蒸馏法)。采用

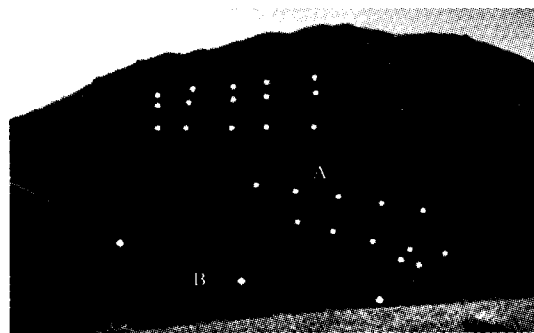


图 1 采样点分布图

Fig.1 The picture describes the distribution patterns of sample plots
A: 阴坡大林斑, B: 半阴坡小林斑 A: Big forest pattern located in the shade slope, B: Small forest patterns located in the semi-shade slope

SPSS11.0 软件进行统计分析和主成分分析。

2 结果

2.1 土壤有机碳和植被特征

在阴坡,土壤有机碳沿林斑下线边缘外的灌木群落至上线边缘外的灌木群落呈递增趋势,但存在较大的变异性,最大值为 156.2g/kg,最小值为 46.2g/kg,变异系数在 11.0% ~ 33.7% 之间。沿这条样线,云杉林的平均密度在减小,而平均胸径在增大,灌木和草本生物量随云杉林的郁闭度增大而减小,而苔藓正好相反(表 1)。此外,半阴坡的小林斑中心土壤有机碳含量明显高于边缘,阳坡草地的土壤有机碳含量较小((23.2 ± 5.6)g/kg)。

表 1 祁连山青海云杉林斑的植被状况和土壤有机碳特征

Table 1 Characteristic of vegetation and soil organic carbon of *Picea crassifolia* forest patches

坡向 Slope aspect	样点 Sample spot	有机碳 Soil organic carbon (g/kg)	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	郁闭度 Canopy density	云杉平均密 度 Average density offorest (indi/100m ²)	云杉平均胸 径 Average diameter of breast height (cm)	灌木生物量 Biomass of shrub (kg/m ²)	草本生物量 Biomass of herbage (kg/m ²)	苔藓生物量 Biomass of moss (kg/m ²)
阴坡 Shade slope	林下灌木 Shrub of low forest	83.7 ± 26.3a	0.73 ± 0.3a	—	—	—	0.44 ± 0.17a	0.48 ± 0.1a	0.1 ± 0.1a
	林下边线 Sideline of low forest	91.0 ± 30.0a	0.62 ± 0.0a	0.53 ± 0.12a	48.1 ± 11.3a	49.2 ± 10.1a	0.04 ± 0.02b	0.10 ± 0.1b	2.1 ± 0.9b
	林中下线 Middle of patch forest	98.8 ± 24.6a	0.56 ± 0.1a	0.52 ± 0.09a	54.6 ± 12.1a	54.6 ± 13.1a	0.01 ± 0.01b	0.07 ± 0.1b	7.2 ± 3.5c
	林中上线 Middle of patch forest	93.8 ± 46.1a	0.34 ± 0.0b	0.49 ± 0.07a	62.6 ± 8.1a	62.6 ± 18.1a	0.02 ± 0.03b	0.08 ± 0.1b	7.9 ± 1.8c
	林上边线 Sideline of up forest	122.8 ± 26.5b	0.37 ± 0.1b	0.28 ± 0.11b	90.0 ± 15.2b	90.0 ± 18.7b	0.12 ± 0.06b	0.26 ± 0.2a	1.7 ± 1.4b
	林上灌木 Shrub of up forest	105.3 ± 11.0b	0.56 ± 0.1a	—	—	—	1.91 ± 0.71c	0.37 ± 0.1a	1.2 ± 1.4b
	林窗 Forest gap	99.0 ± 14.5a	0.38 ± 0.1b	0.24 ± 0.13b	43.6 ± 6.7a	43.6 ± 6.0a	0.03 ± 0.04b	0.36 ± 0.3a	2.4 ± 2.3b
半阴坡 Semi-shade slope	林上边线 Upper forest	58.4 ± 9.1c	0.72 ± 0.1a	0.51 ± 0.12a	44.3 ± 7.2a	44.3 ± 22.6a	0.03 ± 0.04b	0.29 ± 0.2a	0.9 ± 1.2a
	林中 Middle forest	71.6 ± 9.3c	0.66 ± 0.1a	0.70 ± 0.02a	53.6 ± 5.9a	53.6 ± 28.8a	0.01 ± 0.01b	0.10 ± 0.1b	4.5 ± 3.4c
阳坡 Sunny slope	林下边线 Low forest	62.7 ± 12.6c	0.66 ± 0.1a	0.54 ± 0.15a	50.5 ± 8.5a	50.5 ± 18.2a	0.05 ± 0.06b	0.25 ± 0.1a	1.0 ± 0.7a
	海拔 Elevation 2700 ~ 3000m	23.2 ± 5.6d	1.34 ± 0.2c	—	—	—	—	0.32 ± 0.4a	—

同一列中标有不同字母的表示在 5% 水平上差异显著 Values marked with the same letter within a column means not significantly different ($p > 0.05$) using one-sample T test of SPSS software

2.2 土壤有机碳含量与环境因子关系

2.2.1 土壤有机碳与地形因子关系 图 2 反映了土壤有机碳含量与各环境因子的关系及其回归曲线。从图 2 可以看出,土壤有机碳含量与海拔呈显著性正相关关系,相关系数为 0.515, $p = 0.000$ 。直线拟合公式: $SOC = 0.07h - 119.15$, $R^2 = 0.27$ (SOC 土壤有机碳含量(g/kg), h 海拔(m))。随海拔升高,土壤有机碳含量呈增加趋势。另外,坡向是直接关系到林斑的分布,对土壤有机碳含量影响较大。总体上,阴坡的土壤有机碳含量高于半阴坡和阳坡。土壤有机碳含量随坡度变化的直线拟合公式为: $SOC = 0.3g + 77.69$, $R^2 = 0.02$ (SOC 土壤有机碳含量(g/kg), g 为坡度)。经分析检验,土壤有机碳与坡度不存在显著性相关关系(表 2)。

2.2.2 土壤有机碳含量与植被因子的关系 不同植被类型对土壤有机碳含量的影响程度不同,从图 2 和表 2 可以看出,土壤有机碳含量与青海云杉林的郁闭度呈显著负相关关系,其相关系数为 -0.393 ($p = 0.002$)。在灌木群落内,土壤有机碳含量与灌木生物量呈显著正相关关系,相关系数为 0.26 ($p = 0.045$),而与云杉林的平均胸径、草本生物量和苔藓生物量没有显著性相关关系。

2.2.3 土壤有机碳含量与土壤其它因子关系 研究区表层土壤 pH 值范围在 0.7 ~ 0.8 之间,土壤机械组成以粘粒为主。在林斑尺度上 pH 值、粒径组成差异不显著^[9]。因此,在本次研究中未分析 pH 值和土壤粒径对

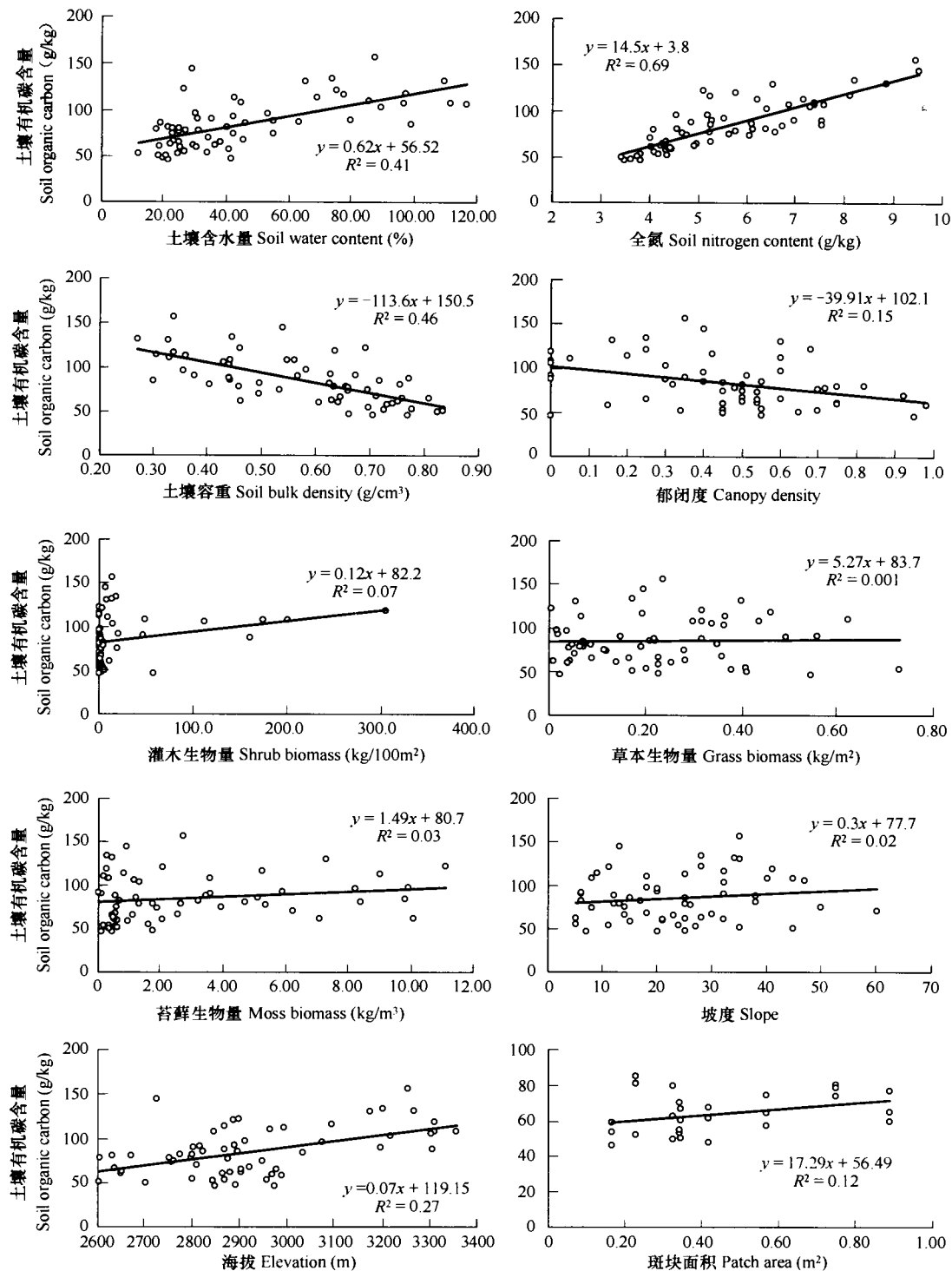


图2 土壤有机碳与影响因子的回归关系

Fig.2 Regression relationship between soil organic carbon and environment factors

土壤有机碳的影响,而从土壤水分和养分方面进行分析。从表2可以看出,土壤有机碳与土壤含水量、土壤容重和全氮都存在显著性相关,其中土壤含水量和全氮与土壤有机碳含量呈正相关,相关系数分别为0.641 ($p = 0.000$)和0.832 ($p = 0.000$),而与土壤容重呈现显著负相关,相关系数为-0.68 ($p = 0.000$)。

2.2.4 土壤有机碳含量与斑块面积关系 林斑面积直接影响到林内小气候环境以及林下植被状况,林斑面积越小,受边界气候条件的影响越明显,林下植被状况、气候条件等与周围环境越相似。研究表明:对于半阴坡 $0.17 \sim 0.89\text{hm}^2$ 的小斑块林地来说,其斑块面积对土壤有机碳含量并没有显著的影响,而林木郁闭度和土壤含水量是主导的影响因子。此外,对于 10 ~ 15a 前采伐形成的林窗斑块,其斑块植被发生较大变化,草本物种丰富度、生物量都明显增加,但土壤有机碳含量变化不显著,这表明土壤有机碳的动态变化是一个相对漫长的过程,为了研究这种采伐干扰对土壤有机碳的影响还需要更长的时间去探索。

2.3 影响土壤有机碳含量因子的主成分分析

从表 3 可以看出,第一主成分与海拔高度和土壤含水量有较大的正相关,它反映了土壤温度较低、含水量较高,有机碳分解释放缓慢的土壤环境。第二主成分与云杉郁闭度有较明显的相关关系,它反映了由于云杉林的遮荫使林内光线不足,不利于枯落物分解。第三主成分与灌木生物量有较大的正相关。这 3 个主成分累计解释率为 83.3%。

表 3 环境因子的主成分分析矩阵

Table 3 Matrix of principal component of environment factors

变量 Variable	成分 Component					
	1	2	3	4	5	6
海拔 Elevation	0.850	0.608	0.053	-0.042	0.213	-0.260
坡度 Gradient	0.143	0.521	-0.422	0.400	-0.186	0.254
物种数 Number of species	0.310	-0.478	-0.022	0.084	-0.016	0.075
全氮 Total nitrogen	0.628	0.175	0.185	-0.339	0.000	0.493
土壤含水量 Soil water content	0.829	0.538	0.111	-0.172	0.018	-0.117
土壤容重 Soil bulk density	-0.223	0.126	0.434	0.488	0.302	0.212
云杉林郁闭度 Canopy density	-0.306	-0.751	-0.186	0.010	0.123	0.148
云杉密度 Density of forest	-0.423	0.154	-0.233	-0.286	0.415	-0.052
灌木生物量 Biomass of shrub	0.455	0.380	0.602	0.330	0.282	0.081
草本生物量 Biomass of herbage	0.509	-0.548	-0.015	0.176	0.077	-0.088
苔藓生物量 Biomass of moss	-0.461	0.417	0.359	0.048	-0.417	-0.084

3 讨论

土壤有机碳主要来源于植物、动物、微生物残体和根系分泌物,并处于不断分解与形成的动态过程,因此土壤有机碳含量是生态系统在特定条件下的动态平衡值。在不同的生物气候条件和人类扰动下,土壤有机碳积累的数量存在很大差异^[10]。祁连山青海云杉林主要分布在阴坡和半阴坡,林木分布上线的海拔高度为 3200 ~ 3300m。从研究结果来看,随海拔升高土壤有机碳含量增大,其主要原因是受降水量和气温变化的影响。因为在较高海拔地区,降水量较高,土壤湿度大,并且温度低,影响动植物残体的分解释放,大部分以有机物形式沉积在土壤中^[10,11]。祁连山区气温随海拔升高而递减,递减率为 $0.58^\circ\text{C}/100\text{m}$;降水量随海拔升高而递增,递增率为 $18.6\text{mm}/100\text{m}$ ^[10]。此外,在垂直方向上土壤有机碳含量因植被的影响使变异性更显著。

与林斑相邻的灌木群落,土壤有机碳含量随灌木生物量增高而增高,但同时也受到土壤含水量、温度、降水等的影响。林斑上线边缘灌木群落的土壤有机碳含量高于林下边缘灌木群落的主要原因是林上线的降水量高、温度低、土壤含水量高(图 3),并且几乎不受放牧的干扰。

表 2 土壤有机碳和环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of soil organic carbon and environment

环境因子 Environment factors	相关系数 Correlation coefficient <i>p</i>	
海拔 Elevation (m)	0.515 * *	0.000
坡度 Gradient	0.145	0.270
土壤含水量 Soil water content (%)	0.641 * *	0.000
土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	-0.68 * *	0.000
土壤全氮 Total nitrogen (g/kg)	0.832 * *	0.000
郁闭度 Canopy density	-0.393 * *	0.002
云杉平均胸径 Diameter of breast height (cm)	0.119	0.366
灌木生物量 Biomass of shrub (kg/100m ²)	0.260 *	0.045
草本生物量 Biomass of herbage (kg/m ²)	0.035	0.792
苔藓生物量 Biomass of moss (kg/m ²)	0.173	0.186
斑块面积 Patch area (m ²)	0.348	0.075

* * 表示在 0.01 水平上显著相关 Significant correlation in the 0.01 level; * 表示在 0.05 水平上显著相关 Significant correlation in the 0.05 level

本次研究所选择的林窗主要分布在阴坡大林斑的中部,林窗面积在 $0.02 \sim 0.12\text{hm}^2$ 之间,其植被发生了较明显的变化,草本物种多样性、生物量都明显增加。跟阴坡草地和阳坡草地的土壤有机碳含量相比,林窗草地 > 阴坡草地 > 阳坡草地。与同一海拔高度的林地相比,林窗的土壤有机碳、土壤含水量、土壤容重都没有发生明显的变化,这是否与林窗面积和采伐的时间长短有关还需要进一步的研究。

影响青海云杉林斑土壤有机碳含量的因素较多,而且各个因素的影响程度不同,在不同斑块面积和位置所起主导因素也不同。经主成分分析表明,海拔高度和土壤含水量是影响土壤有机碳含量的第一主成分,林木郁

闭度是第二主成分,灌木生物量是第三主成分,累计解释率为 83.8%。此外,半阴坡小林斑的斑块面积对土壤有机碳没有明显的影响,这可能是因为林斑面积普遍较小,所形成的小气候环境基本一致。

4 结论

祁连山青海云杉林斑主要分布在阴坡和半阴坡。处在阴坡的大斑块林地土层较薄,一般在 $50 \sim 100\text{cm}$ 左右,表层土壤有机碳含量受海拔、土壤含水量、植被类型、林木郁闭度和灌木生物量等的影响,使其在空间上存在较大的变异,平均有机碳含量为 $(84.9 \pm 26.7)\text{g/kg}$,变异系数为 31.5%。相关分析表明:土壤有机碳含量与土壤含水量、海拔、土壤容重和灌木生物量呈显著正相关关系,而与林木郁闭度呈显著负相关关系。

人为采伐形成的林窗斑块,其植被发生较大变化,草本物种丰富度、生物量都明显增加,但土壤有机碳含量变化不显著。对于半阴坡的小林斑来说,其斑块面积大小并未明显影响土壤有机碳含量的变化。

References:

- [1] Evrendilek F, Celik I, Kilic S. Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forest, grassland, and cropland ecosystems in Turkey. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59: 743 ~ 752.
- [2] Wang Y X, Zhao S D, Niu D. Research state of soil carbon cycling in terrestrial ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(5): 29 ~ 35.
- [3] Jin F, Yang H, Cai Z C, et al. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 522 ~ 528.
- [4] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for policy makers. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001, 944PP.
- [5] Wang Y F, Chen Z Z, Larry T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 545 ~ 551.
- [6] Li L H. Effects of land-use change on soil carbon storage in grassland ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 300 ~ 302.
- [7] Allen M F. Belowground spatial patterning: Influence of root architecture, microorganism and nutrients on plant survival in arid lands. In: Allen E B, ed. *The Reconstruction of Disturbed Arid Ecosystems*. Boulder: Westview Press, 1988. 113 ~ 135.
- [8] Schesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2): 364 ~ 374.
- [9] Wang J Y, Chang X X, Ge S L, et al. Character of water-heat and vegetation distributing in the North-slope of Qilian Mountain. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(supp.): 1 ~ 3.
- [10] Fu H, Chen Y M, Wang Y R, et al. Organic carbon content in major grassland types in Alex, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 469 ~ 476.
- [11] Burke I C, Yonker C M, Ponton W J, et al. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. Grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 800 ~ 805.

参考文献:

- [2] 汪业勋,赵士洞,牛栋. 陆地土壤碳循环的研究动态. *生态学杂志*, 1999, 18(5): 29 ~ 35.
- [3] 金峰,杨浩,蔡祖聪,等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 522 ~ 528.
- [5] 王艳芬,陈佐忠, Larry T Tieszen. 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.
- [6] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 300 ~ 302.
- [9] 王金叶,常学向,葛双兰,等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布. *西北林学院学报*, 2001, 16(增): 1 ~ 3.
- [10] 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.

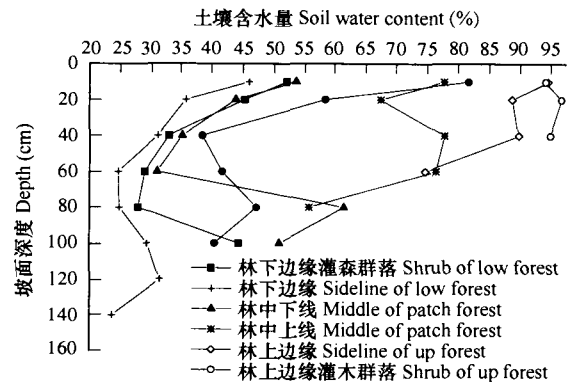


图3 不同调查样线平均土壤含水量

Fig.3 Average soil water content of different sapling lines