

文章编号: 1008-2786-(2006)6-654-08

祁连山北坡垂直带土壤碳氮分布特征

胡启武^{1,3}, 欧阳华^{1*}, 刘贤德²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000)

(3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 对祁连山北坡垂直带山地草原、森林、高山灌丛土壤有机碳和全氮的分布特征进行了研究, 结果表明: 土壤有机碳和全氮含量山地草原 < 青海云杉林 < 高山灌丛, 表现为随海拔升高呈现上升趋势, 且海拔 3 100 m 以上土壤碳、氮含量显著高于 3 100 m 以下土壤碳、氮含量; 土壤有机碳和全氮在土壤剖面中的垂直分布大多表现为 0~10 cm 含量高于 10 cm 以下各层次的含量。土壤有机碳和全氮含量与土壤水分含量呈显著正相关 ($r=0.913$, 0.874 , $n=117$, $p=0.001$), 和年平均气温呈显著负相关 ($r=-0.883$ - -0.869 , $n=10$, $p=0.001$), 表明了气候因子对有机碳和全氮在垂直带上的空间分布起决定作用。整个垂直带土壤碳氮比在 7.8~24.7 间, 有利于有机质矿化过程中养分的释放。作为祁连山北坡垂直带乔木林主体部分, 青海云杉 (*Picea crassifolia*) 林土壤碳密度为 18.13 kg/m^2 , 与一般常绿针叶林土壤碳密度相当, 但远小于针叶林中的云冷杉林土壤碳密度。

关键词: 祁连山; 垂直带; 有机碳; 全氮

中图分类号: P951.X144

文献标识码: A

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 全球大约有 1.500 Pg 的碳以有机态的形式存在于土壤中, 是陆地植被碳库 ($500\sim 600 \text{ Pg}$) 的 2~3 倍, 大气碳库 (750 Pg) 的 2 倍^[1,2], 在大气 CO_2 浓度不断上升, 全球气候发生显著变化的情景下, 土壤作为大气 CO_2 的源还是汇仍然存在争议, 这取决于土壤中有有机质的输入和输出的平衡结果。增温被认为会加速土壤中的碳向大气中排放^[3~5], 而 CO_2 浓度增加则被认为会促进植物生长^[6~8], 从而增加土壤中碳的输入量。准确估算土壤碳库储量及收支状况, 对正确评价土壤在陆地生态系统碳循环、全球气候变化中的作用有重要意义。

氮素是植物的主要养分来源之一, 在地球上大多数地方都是陆地植物生长的主要限制因子^[9,10], 一方面, 土壤碳氮比通常被认为是土壤氮素矿化能力的标志^[11,12], 碳氮比低有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放, 土壤中的有效氮增加; 反之,

微生物在分解有机质的过程中会存在氮受限, 从而与植物存在对土壤无机氮的竞争, 不利于植物的生长及 NPP 的增加。另一方面, NPP 的大小以及植物组织中的碳氮比又直接决定了植物体死亡以后, 枯落物分解进入土壤的量和速率。从而, 碳素和氮素在生态系统的物质循环中被紧密的联系在一起。

在国际地圈-生物圈研究计划中, 青藏高原被列为全球气候变化的敏感区域, 这种极端环境下发育的植被和土壤对气候变化极为敏感, 是研究生态系统对气候变化响应与适应机制的天然实验室。由于水热因子的差异, 高原不同部位发育了不同类型的山地垂直带, 相对于高原东部或东南部的山地, 高原东北部的祁连山山地以高寒半干旱为特征^[13], 发育了以山地荒漠为基带的垂直带, 近年来对于祁连山山地的研究多集中于以青海云杉 (*Picea crassifolia*) 为主体的水源涵养林的结构和功能上^[14], 而对于垂直带土壤性质, 特别是对气候变化具有反馈作

收稿日期 (Received date): 2006-03-28; 改回日期 (Accepted): 2006-08-01.

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展计划项目“青藏高原环境变化及其对全球变化的响应与适应对策” (2005CB422005)。[National key Basic Research program 92005CB422005].

作者简介 (Biography): 胡启武 (1979-), 男, 博士生, 研究方向: 陆地生态系统格局与过程。Email: huqw_04b@igsnr.ac.cn [Hu Qiwu (1979-), male, Ph.D candidate, specialized in pattern and process of terrestrial ecosystem.]

用的土壤碳、氮等特征方面的工作开展较少^[15 16]。我们选择祁连山北坡山地垂直带为对象, 研究垂直带上山地草原、森林、高山灌丛土壤的碳、氮分布格局, 目的是阐述以下几方面的问题: 1. 祁连山山地垂直带主要植被类型下土壤碳、氮分布特征; 2. 同一植被类型下土壤碳、氮分布的空间差异; 3. 土壤碳、氮分布与温度、水分等气候因子之间的关系。从而为研究祁连山山地生态系统对气候变化的响应提供基础资料, 为理解青藏高原对气候变化响应的区域差异提供科学依据。

1 研究区概况

祁连山地理位置为 $93^{\circ}30' \sim 103^{\circ}E$, $36^{\circ}30' \sim 39^{\circ}30'N$, 属大陆性高寒半干旱, 半湿润的森林草原气候。山脉由西北走向东南, 起伏延绵千余公里, 相对高差悬殊, 主峰祁连山素珠链峰高 5 564 m, 导致气候在水平、垂直方向都有明显的差异^[13]。研究区设在甘肃省张掖市肃南裕固族自治县东北部的排露沟流域, 地理坐标 $100^{\circ}17'E$, $38^{\circ}24'N$, 海拔 2 100~3 800 m, 年均气温 $1.5^{\circ}C$, 7 月份平均气温 $10 \sim 14^{\circ}C$; 年降水在 290.2~467.8 mm 间变化, 年均 374.1 mm, 平均相对湿度 60% (1994~2004 年)^[17]。关于祁连山北坡垂直带植被分布情况已有详细报道^[13 18], 主要有干性灌丛草原植被带 (2 100~2 500 m), 森林草原植被带 (2 500~3 300 m), 亚高山灌丛草甸植被带 (3 300~3 800 m)。

2 材料与方法

2005–07 在研究区域沿海拔梯度设置土壤采样点, 主要包括了垂直带的 3 种植被类型: 山地草原, 山地森林, 高山灌丛。其中, 山地草原优势种有短花针茅 (*Stipa breviflora*)、长芒草 (*S. bungeana*)、冰草 (*A. grqpyron cristatum*) (2 400 m)、紫花针茅 (*Stipa pupurea*)、甘青针茅 (*S. przewalskyi*) 等 (2 600 m); 山地森林为青海云杉 (*Picea crassifolia*) 纯林。高山灌丛优势种有箭叶锦鸡儿 (*Caragana jubata*)、吉拉柳 (*Salix gilashanica*) 等。因为青海云杉林是祁连山地区的主要森林类型, 我们重点在云杉林设置了多个采样点, 采样点具体分布情况见表 1。每个采样点挖取 3 个剖面, 共挖取土壤剖面 30 个, 土壤采样采取机械采样方法, 主要采集土壤表层 0

~ 10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm 样品。样品分两份, 一份由环刀取样放进密闭自封袋回实验室测土壤水分和容重; 另一份装入土壤布袋, 回实验室风干, 过 1 mm 筛, 然后磨细, 分析土壤有机碳、全氮。土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化–外加热法, 土壤全氮测定采用凯氏定氮法, 土壤水分在 $105^{\circ}C$ 温度下烘干 10 h 左右测定。另外, 土壤碳密度计算采用公式^[19]

$$SOC_i = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i D_i E_i (1 - G_i) / 10$$

式中 SOC_i 为单位面积土体的碳密度 (kg/m^2), k 为土壤所分层次, C_i 为土壤有机碳含量 (%), D_i 为容重 (g/cm^3); E_i 为土层厚度 (cm); G_i 为大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比 (%)

3 数据处理

数据分析采用 SPSS 10.0 软件中的相关、回归 (Liner Regression), 平均值的比较 (One – Way ANOV) 等方法, 数据制图采用 Signa plot9.0 软件。

4 结果与分析

4.1 垂直带土壤水分、年平均气温随海拔梯度的变化

随着海拔的上升, 土壤水分含量呈现上升趋势 (图 1)。土壤水分含量最低值出现在海拔 2 400 m 处山地草原, 其表层 40 cm 深度平均水分含量 11.43%, 沿土壤剖面深度增加略有递增的现象, 这主要跟 2 400 m 处山地草原地带气温高, 降水少, 地表植被盖度低, 表层土壤水分蒸发强度大有关。土壤水分的最高值出现在海拔 3 100 m 处的青海云杉林, 平均含量达到 51.67%, 是 2 400 m 处山地草原的 4.5 倍, 一方面, 随海拔上升, 大气降水增加, 土壤变得相对湿润; 另一方面, 3 100 m 云杉林季节性冻土分布比较普遍, 生长季气温逐步升高, 冻土融化的水分成为土壤水分的重要来源, 这也是海拔 3 100 m 及更高海拔土壤水分普遍保持较高水平的一个原因。海拔 2 600 m 处草原土壤水分含量 16.16%, 由于处于阳坡或半阳坡, 蒸发量大, 土壤水分含量比低于其海拔高度的森林 (2 550 m 青海云杉林) 要低 26%。对于青海云杉林, 其所分布的区域土壤水分条件从较低海拔的 20% 左右到林线地带的 50% 左右, 表现出较大的土壤水分适应性。高山灌丛分布于高海

拔地带,土壤水分与 3 100 m 以上云杉林相当,保持在 50 % 左右。根据张虎等^[18]在同一地区所做的气温与海拔之间的回归关系 $T_H = 15.5 - 5.369 \times 10^{-3} H$ (T_H 代表年均温, H 代表海拔高度), 我们计算了祁

连山垂直带各海拔梯度处的年均温(表 1), 其中, 依据上述回归关系式计算所得海拔 2 600 m 处年均温 1.54 °C 与分布于 2 570 m 地面气象站 1994~ 2004 年多年平均值 1.5 °C 十分接近^[17]。

表 1 土壤采样点基本情况
Table 1 Characteristics of soil sampling plots

植被类型	海拔 (m)	年均温 (°C)	坡向	坡度	纬度	经度
山地草原	2 400	2.61	NE 10°	26°	38° 35.443'N	100° 18.312' E
青海云杉林	2 550	1.81	NW 25°	28°	38° 34.789'N	100° 17.437' E
山地草原	2 600	1.54	NW 65°	30°	38° 34.044'N	100° 17.342' E
青海云杉林	2 650	1.27	N	37°	38° 34.045'N	100° 17.390' E
青海云杉林	2 750	0.74	N	23°	38° 33.198'N	100° 17.133' E
青海云杉林	2 950	-0.39	NE 20°	27°	38° 32.588'N	100° 17.971' E
青海云杉林	3 100	-1.14	N	28°	38° 32.334'N	100° 18.106' E
青海云杉林	3 200	-1.68	NE 20°	38°	38° 32.242'N	100° 18.103' E
青海云杉林	3 300	-2.22	NE 28°	38°	38° 32.152'N	100° 18.265' E
高山灌丛	3 420	-2.86	NE 40°	44°	38° 32.058'N	100° 18.078' E

4.2 垂直带土壤有机碳含量随海拔梯度的变化

垂直带土壤有机碳含量随海拔上升可以分为 3 个变化区间段: 2 400 m 处的山地草原有机碳含量最低, 表层 40 cm 平均有机碳含量为 1.43 %; 2 550~ 2 950 m 间包括了阴坡和半阴坡的青海云杉林以及阳坡草地, 土壤平均有机碳含量变化范围为 3.57 % ~ 5.16 %; 3 100 m (包括 3 100 m) 以上海拔土壤有机碳含量明显增加, 平均有机碳含量变化范围为 8.51 % ~ 9.66 % (图 2)。以不同植被类型而言, 山地草原的平均有机碳含量为 2.48 %, 青海云杉林平均有机碳含量为 6.53 %, 高山灌丛平均有机碳含量为 8.50 %。

对于山地草原, 研究区域海拔 2 400 m 山地草原和 2 600 m 山地草原在海拔高度上相差 200 m, 同属于栗钙土, 但土壤有机碳含量却存在较大差异, 2 600 m 草原土壤有机碳含量是 2 400 m 草原的 2.5 倍; 在土壤剖面层次上, 2 400 m 山地草原有机碳含量沿剖面深度逐渐增加, 在 30 cm 深度出现相对的峰值 1.8 %, 而 2 600 m 山地草原则在土壤表层 10 cm 出现有机碳含量的最高值 3.99 %, 沿剖面深度逐渐降低。2 400 m 山地草原主要以短花针茅、长芒草、冰草等为优势种, 接近于荒漠草原类型, 由于极低的生产力, 地表凋落物输入相应的较少, 因而, 土壤有机碳含量低; 同时, 植被稀疏, 地表覆盖度低, 表层土壤有机碳容易遭到侵蚀而流失或者淋溶到较深

土层, 从而造成表层 0~ 10 cm 的有机碳含量比 10 cm 以下层次的有机碳含量低。而 2 600 m 山地草原主要优势种有甘青针茅、紫花针茅等, 接近于高寒草原类型, 由于分布在较高的海拔, 限制生产力的水分条件相应的好于 2 400 m 山地草原, 因而生产力高于 2 400 m 山地草原, 输入土壤的有机质来源相应的较多, 同时气温较低, 有机质的分解速率相对较慢, 所以具有较高的土壤有机碳含量。祁连山草地栗钙土平均有机碳含量 2.48 %, 高于耿远波等^[20]报道的内蒙古草原暗栗钙土 (1.85 %)、典型栗钙土 (1.60 %)、淡栗钙土 (1.23 %) 的有机碳含量, 与青藏高原草地栗钙土土壤有机碳含量 2.23 % 比较接近^[21]。

对于青海云杉林, 由于地形、气候以及云杉生理习性等因素的影响, 采样区域海拔 2 700 m 以下青海云杉在阴坡或半阴坡呈斑块状分布, 2 700 m 以上则呈现相对聚集分布, 在 3 300 m 左右形成云杉林线。从采样点的分布来看, 我们对青海云杉的土壤采样覆盖了青海云杉在垂直带上的整个分布区域, 相应的点也代表了青海云杉的不同生产力分布以及不同的温度、水分等环境因素条件。方差分析结果显示 7 个海拔高度处土壤有机碳之间存在显著差异 ($F = 29.575$, $P = 0.000$), 但海拔 2 550~ 2 950 m 间的 4 个采样点之处的有机碳含量没有显著差异, 3 100~ 3 300 m 间的 3 个采样点青海云杉林土壤有

机碳含量之间也没有显著差异。与分布于 3 100 m 以下的云杉林土壤有机碳含量相比较, > 3 100 m 的云杉林土壤有机碳含量显著增加, 表层 40 cm 平均有机碳含量达到 9.19%, 是 3 100 m 以下云杉林土壤有机碳含量的 1.94 倍。尽管 3 100 m 以上 3 个采样点云杉林土壤有机碳之间的差异没有达到显著性水平, 但随着海拔的进一步上升, 云杉逐渐变得稀疏, 土壤有机碳含量有降低的趋势, 3 300 m 林线处土壤有机碳含量是 3 100 m 处的 88%。对于 3 100 m 以下云杉林与 3 100 m 以上云杉林土壤有机碳含量存在的显著差异, 我们认为, 气候因子起主要作用, 在祁连山地区, 海拔每增加 100 m, 年均温降低 0.58℃, 降水增加 4.3%^[18], 同时, 由于 3 100 m 以上季节性冻土的普遍存在, 使得土壤水分含量是较低海拔土壤水分含量的 2 倍, 低温和高的土壤水分含量有利于有机碳的累积。而 2 550 m~2 950 m 间云杉林土壤有机碳含量不存在差异, 甚至 2 950 m 云杉林土壤有机碳含量还低于更低海拔处的云杉林有机碳含量, 这可能跟 2 950 m 海拔处云杉林处于整个云杉林分布的中间地带有关, 相对于有机质的输入, 适宜的温度、水分条件更有利于微生物对有机质的分解, 从而导致土壤有机碳含量较低。青海云杉林土壤有机碳含量随剖面深度增加没有明显的逐渐降低规律, 这可能是森林土壤的淋溶过程导致, 但表层 0~10 cm 土壤有机碳含量都高于 10 cm 以下各层次的含量。青海云杉林土壤表层有机碳含量最高值 11.67%, 同青藏高原东部贡嘎山暗针叶林 15.31%^[21]相比较, 高原东北部的祁连山针叶林土壤有机碳含量明显偏低, 这可能是两地针叶林的生产力差异导致, 贡嘎山暗针叶林(峨嵋冷杉林)生产力达到 12.930 t/(hm²·a)^[23], 凋落物量为 2 809.925 kg/(hm²·a)^[24]; 而青海云杉林年净生产量为 3.80 t/(hm²·a), 凋落物量为 2.166 kg/(hm²·a)^[25], 分别为贡嘎山的 30% 和 77%, 从而导致输入土壤的有机质来源相对较少。

高寒灌丛平均有机碳含量 8.50%, 是整个云杉林的有机碳含量的 1.3 倍, 但却稍低于 3 100 m 以上的云杉土壤有机碳含量。

4.3 垂直带土壤全氮含量随海拔梯度的变化

垂直带土壤全氮分布与有机碳分布规律大体相同, 沿海拔上升土壤全氮含量增加, 且海拔 3 100 m 以上(包括 3 100 m)土壤全氮含量明显高于 3 100 m 以下土壤全氮含量(图 3)。从植被类型上看, 山

地草原的全氮含量最低, 表层 40 cm 平均值为 0.195%, 高寒灌丛全氮含量最高, 达到 0.4403%, 而青海云杉林的土壤全氮含量平均值则为 0.351%。对于云杉林, 全氮分布类似于有机碳分布: 3 100 m 海拔处出现了整个垂直带土壤全氮的最高值 0.527%, 2 550~2 950 m 间的 4 个海拔取样点处土壤全氮含量平均值为 0.253%, 相互之间不存在显著差异($F=0.559$, $P=0.657$); 3 100~3 300 m 3 个取样点处的土壤全氮含量平均值为 0.499%, 是 3 100 m 以下云杉林土壤全氮含量的 1.97 倍, 相互之间差异也不显著($F=3.026$, $P=0.123$), 但 3 100 m、3 200 m 云杉林比 3 300 m 云杉林土壤全氮含量高 18% 和 14% 左右。对于山地草原, 全氮分布与有机碳分布存在一定的差异: 海拔 2 400 m 处山地草原有机碳含量在 30 cm 出现相对峰值, 但全氮含量表层 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 都在 0.15% 左右, 没有明显差异; 2 600 m 处山地草原的有机碳含量低于较低海拔处的云杉林有机碳含量, 但全氮含量与 2 550~2 950 m 间的云杉林没有显著差异, 表层 0~10 cm 土壤全氮含量甚至稍高于低海拔(2 550 m, 2 650 m)的云杉林。

4.4 垂直带土壤有机碳和全氮之间的关系

土壤中氮主要以有机态存在, 它一般占全氮含量的 95% 以上^[26], 土壤全氮量的消长取决于有机质含量的变化, 研究区整个垂直带土壤有机碳与全氮含量呈显著正相关($r=0.922$, $p=0.000$)(图 4), 对碳氮含量做线性回归分析, 可以求得回归方程: $y=18.094x-0.0911$ (y 代表有机碳含量, x 代表全氮含量), 有机碳和全氮之间的显著正相关关系进一步解释了垂直带土壤碳氮分布规律的相似性。另外, 碳氮比被认为是土壤氮矿化能力的重要指标, 土壤有机质模型 CENTURY^[27] 就是根据碳氮比来决定有机质分解过程中是发生矿化(Mineralization)还是微生物固持(Imobilization), 较低的碳氮比有利于氮的矿化养分释放, 通常认为土壤碳氮比在 25~30:1 以下会出现净矿化^[12]。山地草原土壤碳氮比在 7.8~16.2 之间, 青海云杉林在 15.3~24.7 之间, 高寒灌丛在 17.6~20.4。总体来说, 祁连山垂直带土壤的碳氮比是适合微生物的矿化的, 即微生物在分解有机质的过程中是不受氮限制的, 有利于分解过程中的养分释放。

4.5 垂直带土壤碳、氮含量与温度、水分的关系

以采样期间的垂直带土壤水分含量、垂直带各

海拔梯度的年平均气温与垂直带土壤有机碳、全氮含量做相关分析,结果显示土壤水分与碳、氮含量有着极显著的正相关关系 ($r = 0.913, 0.874, n = 117, p = 0.000$), 年平均气温与碳、氮含量则呈现极显著负相关关系 ($r = -0.883, -0.869, n = 10, p = 0.001$)。说明了气候对整个垂直带的土壤碳、氮分布的决定作用。土壤有机碳主要来源于地表凋落物、微生物生物量的输入, 输出过程则是在微生物的作用下以 CO_2 的形式向大气中释放; 土壤中 95% 的氮以有机态的形式存在^[26], 主要来源于枯枝落叶和动物尸体, 也有少量来源于大气氮沉降和生物固氮, 土壤氮的输出主要是土壤中的有机质分解, 分解后大部分被植物吸收利用, 部分氮经过硝化、反硝化或挥发以气态释放到大气中^[28]。在土壤碳、氮的蓄积过程中, 气候因子起着重要的作用。一方面, 气候条件制约植被类型、影响植被的生产力, 从而决定输入土壤的碳、氮的量; 另一方面, 从土壤碳、氮的输出过程来说, 微生物是其分解和周转的主要驱动力, 气候通过土壤温度和水分 (同时影响土壤通气状况) 等条件的变化, 影响微生物对有机质的分解和转化^[5]。

4.6 垂直带土壤容重、碳密度随海拔梯度的变化

土壤容重沿海拔上升表现出降低的趋势, 除了海拔 2 400 m 处山地草原土壤容重在 1 g/cm^3 以上外, 其他类型土壤容重均 $< 1 \text{ g/cm}^3$, 且多数土壤剖面表现为表层土壤容重低于深层土壤容重 (表 2)。垂直带土壤碳密度 (表层 40 cm) 变化范围在 $6.1 \sim 19.3 \text{ kg/m}^2$ 之间, 碳密度最高值出现在海拔 3 200 m 云杉林, 最低值出现在 2 400 m 山地草原。由于受土壤容重以及砾石含量 (表 2) 的影响, 碳密度的最高值并没有出现在有机碳含量最高值所出现的 3 100 m 云杉林, 另外, 不同植被类型土壤碳密度沿剖面深度的变化表现出较大的差异: 海拔 2 400 m 处山地草原碳密度跟其有机碳含量变化类似, 在土壤 30 cm 深度处出现峰值; 海拔 2 600 m 处山地草原碳密度表层 0~10 cm 含量最高, 沿土壤剖面逐渐降低; 海拔 2 550 m~2 950 m 间云杉林的碳密度沿土壤剖面逐渐降低, 而 3 100 m~3 300 m 间云杉林土壤碳密度沿土壤剖面逐渐增加; 高山灌丛碳密度沿土壤剖面从上往下逐渐增加 (表 2)。

表 2 垂直带土壤容重、碳密度
Table 2 Soil bulk density and organic carbon density

海拔 (m)	土壤容重 (g / cm ³)				土壤砾石 (> 2mm) 含量 (%)				土壤碳密度 (kg/m ²)				total
	剖面深度 (cm)				剖面深度 (cm)				剖面深度 (cm)				
	0~ 10	10~ 20	20~ 30	30~ 40	0~ 10	10~ 20	20~ 30	30~ 40	0~ 10	10~ 20	20~ 30	30~ 40	
2 400	1. 23	1. 10	1. 11	1. 14	1. 62	4. 16	5. 15	6. 35	1. 46	1. 51	1. 90	1. 23	6. 1
2 550	0. 61	0. 64	0. 65	0. 65	2. 12	3. 05	3. 20	3. 27	3. 37	3. 08	2. 87	3. 03	12. 3
2 600	0. 79	0. 76	0. 77	0. 79	2. 53	2. 97	2. 86	2. 59	2. 95	2. 66	2. 78	2. 35	10. 7
2 650	0. 74	0. 66	0. 63	0. 68	4. 12	2. 12	3. 01	5. 62	3. 36	2. 94	2. 47	2. 56	11. 3
2 750	0. 56	0. 65	0. 66	0. 79	3. 10	2. 68	4. 27	3. 27	3. 53	3. 40	3. 36	2. 90	13. 1
2 900	0. 63	0. 73	0. 75	0. 78	2. 50	1. 60	2. 02	3. 08	3. 96	3. 74	3. 28	2. 87	13. 8
3 100	0. 35	0. 47	0. 51	0. 53	3. 07	4. 24	1. 31	2. 46	3. 84	3. 85	4. 60	4. 64	16. 9
3 200	0. 39	0. 53	0. 58	0. 63	3. 38	1. 05	1. 75	2. 62	3. 75	4. 16	5. 39	6. 00	19. 3
3 300	0. 48	0. 68	0. 78		4. 86	3. 93	1. 77	5. 59	3. 93	4. 80	6. 41		15. 1
3 400	0. 36	0. 49	0. 52	0. 56	5. 11	4. 49	2. 25	8. 69	4. 03	4. 38	4. 50	4. 19	17. 1

注: 表中空白处表示数据缺失

土壤碳密度由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础来计算, 已成为评价和衡量土壤中有有机碳储量的一个极其重要的指标。不同学者对针叶林土壤碳密度的估算结果不尽相同: 解宪丽等^[29]给出了温带常绿针叶林土壤碳密度 20.79 kg/m^2 ; 李克让等^[30]估算结果为常绿针叶林土壤碳密度 17.98

kg/m^2 ; 周玉荣^[31]研究结果表明温性针叶林土壤碳密度 18.96 kg/m^2 , 而云冷杉土壤碳密度 36.079 kg/m^2 在所有的森林类型中最高。祁连山森林土壤碳储量的 80% 存储在表层 40 cm^[15], 据此我们计算了青海云杉林在其整个垂直带分布中的土壤碳密度, 其变化范围在 $14.16 \sim 24.12 \text{ kg/m}^2$, 平均值为 18.13 kg/m^2 , 与上述针叶林的土壤碳密度具有很好

的可比性,但这个数值只有周玉荣关于云冷杉碳密度结果的一半。主要原因可能是青海云杉林一般情况下是纯林,且研究区域多为次生林,生产力比较低,凋落物的输入相对较少。

与王金叶对青海云杉林碳密度估算的结果 $23.15 \text{ kg/m}^{2[15]}$ 相比较,我们估算的云杉林碳密度只有其结果的 78.3%。由于王金叶对青海云杉的采样点涵盖了不同年龄段的云杉,而我们的采样则侧重涵盖青海云杉的不同分布区域,所以不同的采样方法导致了结果比较的困难,但是前者的采样区域在海拔 2 700 m,由于青海云杉的分布区域在 2 500 ~ 3 300 m,且土壤有机碳含量受气候因子的强烈影响,因而,理论上青海云杉林的土壤碳密度应该高于仅仅从海拔 2 700 m 处取样的结果,我们的结论也证实了海拔 3 100 m 以上的云杉林有机碳含量、碳密度显著高于 3 100 m 以下的云杉林。据此,我们进一步推测青海云杉林的土壤碳近十年来呈现下降的趋势,一方面,由于气温升高,土壤碳排放强度增加,研究表明高海拔地区比低海拔地区增温更加显著^[32],气温升高导致土壤微生物活性增加,土壤有机质分解速率加快,常宗强^[33]对该区域森林土壤呼吸的研究结果表明土壤呼吸对温度变化的敏感性指标 Q_{10} 值高于世界平均水平,尤其是 2 750 m 云杉林, Q_{10} 值达到 4.92,即温度升高 10℃,土壤呼吸的强度将增加 4.92 倍。另一方面由于研究区域低海拔地区人类活动强度比较大,特别是放牧牲畜践踏以及水土流失等导致土壤表层碳的流失。除了青海云杉林以外,高寒灌丛林的土壤碳也处于下降的趋势,我们估算的高寒灌丛土壤碳密度为 21.375 kg/m^2 ,是王金叶结果的 85.1%^[15]。

5 结论

1 祁连山北坡山地垂直带主要植被类型有机碳和全氮含量山地草原 < 青海云杉林 < 高山灌丛。

2 垂直带同一植被类型不同海拔分布处土壤有机碳和全氮含量存在较大的差异,对于山地草原,海拔 2 600 m 处草原碳、氮含量是 2 400 m 草原的 2.50 1.54 倍;对于青海云杉林,3 100 m 以上海拔处土壤碳、氮含量是 3 100 m 以下海拔处的土壤碳、氮含量的 1.94、1.97 倍。

3 垂直带土壤有机碳和全氮含量与土壤水分含量呈显著正相关 ($r = 0.913, 0.874, n = 117, p =$

0.001), 和年平均气温呈显著负相关 ($r = -0.883, -0.869, n = 10, p = 0.001$), 表明了气候因子对有机碳和全氮在垂直带上的空间分布起决定作用。

4 垂直带土壤有机碳含量和全氮含量呈显著正相关关系 ($r = 0.922, p = 0.001$), 土壤碳氮比在 7.8 ~ 24.7 之间,有利于有机质矿化过程中养分的释放。

5 青海云杉林土壤碳密度 18.13 kg/m^2 ,与一般针叶林土壤碳密度水平相当,但远小于针叶林中云冷杉林的土壤碳密度,近十年来,青海云杉林土壤碳密度呈下降趋势。

致谢:本研究得到张掖水源林涵养研究院西水生态站的大力支持,谨致谢忱。

参考文献 (References)

- [1] Batjes NH. Total carbon and nitrogen in soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 151~163
- [2] Prentice IC. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide [A]. In Houghton JF, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA. Climate Change 2001: The Scientific Basis [C]. Cambridge University Press: Cambridge, 183~237
- [3] Jenkinson DS, Adams DE, Wild A. Model estimates of CO_2 emissions from soils in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351: 304~306
- [4] Turnbore SE, Chadwick OA, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change [J]. *Science*, 1996, 272: 393~396
- [5] Davidson EA, Turnbore SE, Amundson R. Soil warming and organic carbon content [J]. *Nature*, 2000, 408: 789~790
- [6] Ojima DS, Parton WJ, Schimel DS *et al.* Modelling the effects of climatic and CO_2 changes on grassland storage of soil-C [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, 70: 643~657
- [7] Giesen R, Ceulmans R. The likely impact of rising atmospheric CO_2 on natural and managed Populus: a literature review [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 115: 335~358
- [8] Hamilton JG, De Lucia EH, George K, *et al.* Forest carbon balance under elevated CO_2 [J]. *Oecologia*, 2002, 131: 250~260
- [9] Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7: 737~750
- [10] Panek M, Lohse KA, Hall SJ. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems [J]. *Ambio*, 2002, 31 (2): 113~119
- [11] Paul EA, Clark FE. Soil microbiology and biochemistry [M]. Academic Press: San Diego, 1989.
- [12] Prescott CE, Chappell NH, Vesterdal L. Nitrogen turnover in forest floors of coastal Douglas-fir at sites differing in soil nitrogen capacity [J]. *Ecology*, 2000, 81: 1878~1886
- [13] Wang Jinye, Chang Xuexiang, Ge Shuanglan, *et al.* Vertical distribution of soil carbon and nitrogen in the Qilian Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20: 100~105

- bution of the vegetation and water and heat conditions of Qilian Mountain (northern Slope) [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16 (suppl): 1~3 [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 [J]. 西北林学院学报, 2001, 16 (增): 1~3]
- [14] Che Kejun, Fu Huiq, Wang Jinye. The structure and function of the water conservation forest ecosystems in Qilian Mountains [J]. *Scientia Sinica*, 1998, 34(5): 29~37 [车克钧, 傅辉恩, 王金叶. 祁连山水源林生态系统结构与功能的研究 [J]. 林业科学, 1998, 34(5): 29~37]
- [15] Wang Jinye, Che Kejun, Zhang Xuelong *et al.* A preliminary study on carbon of forest soil in Qilian Mountain [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1996, 4: 356~360 [王金叶, 车克钧, 张学龙, 等. 祁连山森林土壤碳的初步研究 [J]. 甘肃农业大学学报, 1996, 4: 356~360]
- [16] Chang Zongqiang, Pan Aihua, Liu Xiande *et al.* A study on spatial variation of soil nitrogen in pasture of Qilian Mountains [J]. *Journal of Gansu forestry science and technology*, 2004, 29(2): 1~4 [常宗强, 潘爱华, 刘贤德, 等. 祁连山区草地土壤氮空间分布格局 [J]. 甘肃林业科技, 2004, 29(2): 1~4]
- [17] Wang Jinye, Wang Yanhui, Li Xin, *et al.* Water Situation and Runoff Production in the Pailugou Basin of Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 62~69 [王金叶, 王彦辉, 李新, 等. 祁连山排露沟流域水分状况与径流形成 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 62~69]
- [18] Zhang Hu, Wen Yali, Ma Li *et al.* The climate features and regionalization of vertical climatic zones in the northern slope of Qilian Mountains [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 497~502 [张虎, 温娅丽, 马力, 等. 祁连山北坡中部气候特征及垂直气候带的划分 [J]. 山地学报, 2001, 19(6): 497~502]
- [19] Post W M, Emanuel W R, Zinke P, *et al.* Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298(8): 156~159
- [20] Geng Yuanba, Zhang Shen, Dong Yunsheng *et al.* The content of soil organic carbon and total nitrogen and correlativity between their content and fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ in Xilin River Basin Steppe [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 44~52 [耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性 [J]. 地理学报, 2001, 56(1): 44~52]
- [21] Wang Genxu, Cheng Guodong, Shen Yongping. Soil organic carbon pool of Grasslands on the Tibetan plateau and its global implication [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 693~700 [王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693~700]
- [22] Wang Lin, Ou Yanghua, Zhou Caiping *et al.* Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen on the eastern slope of Mt Gongga [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 1012~1019 [王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征 [J]. 地理学报, 2004, 59(6): 1012~1019]
- [23] Luo Ji, Yang Zhong, Yang Qingwei. A study on the biomass and production of forest on the Gongga Mountain [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 191~196 [罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 191~196]
- [24] Luo Ji, Chen Genwei, Cheng Binru *et al.* Characteristic of forest litterfall along vertical spectrum on the Gongga Mountain [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(3): 287~292 [罗辑, 程根伟, 陈斌如, 等. 贡嘎山垂直带林分凋落物及其理化特征 [J]. 山地学报, 2003, 21(3): 287~292]
- [25] Wang Jinye, Che Kejun, Jiang Zhirong. A study on carbon balance of Picea crassifolia in Qilian Mountains [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, 15(1): 9~14 [王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究 [J]. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9~14]
- [26] Huang Ruining. *Environmental Soil* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1994, 145~146 [黄瑞农. 环境土壤学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994, 145~146]
- [27] Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model [J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 109~131
- [28] Zhang Jintun. Effects of global climate change on C and N circulation in natural soils [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(5): 463~471 [张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳氮循环的影响. 地理科学, 1998, 18(5): 463~471]
- [29] Xie Xianli, Sun Ba, Zhou Huizhen *et al.* Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2004, 41(1): 35~43 [解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析 [J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35~43]
- [30] Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. Vegetation and soil Carbon storage in China [J]. *Science In China (Series D)*, 2003, 33(1): 72~80 [李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量 [J]. 中国科学 (D辑), 2003, 33(1): 72~80]
- [31] Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518~522 [周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518~522]
- [32] Liu Xiaodong, Hou Ping. Relationship between the climatic warming over the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas in recent 30 years and the elevation [J]. *Plateau Meteorology*, 1998, 18(2): 113~121 [刘晓东, 侯萍. 青藏高原及其邻近地区近 30 年气候变暖与海拔高度的关系 [J]. 地理科学, 1998, 18(2): 113~121]
- [33] Chang Zongqiang, Shi Zuomin, Feng Qi. Effect of temperature in different communities on soil respiration in Qilian Mountains [J]. *Journal of Chinese Agronomy*, 2005, 26(2): 85~89 [常宗强, 史作民, 冯起. 气温对祁连山不同植被状况土壤呼吸的影响 [J]. 中国农业气象, 2005, 26(2): 85~89]

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen along the Altitudinal Belt in the Northern Slope of Qilian Mountains

HU Qi^{1,3}, OUYANG Hua¹, LU Xiande²

(1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye Gansu 734000, China;

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A study on soil organic (SOC) and total nitrogen (TN) was conducted in the mountainous grassland, *Picea crassifolia* forest and alpine shrubs along the altitudinal belts in the northern slope of Qilian Mountains. results showed that SOC and TN increased with elevation, in the order of mountain grassland < *Picea crassifolia* forest < alpine shrub, and SOC and TN above 3 100 elevation were much higher than that below the elevation gradient. Furthermore, SOC and TN mostly peaked at 10 cm soil depth along the soil profile. SOC and TN showed significant positive correlations with soil water content ($r = 0.913 \sim 0.874$, $n = 117$, $p = 0.000$) and significant negative correlations with annual mean air temperature ($r = -0.883 \sim -0.869$, $n = 10$, $p = 0.001$), which indicated that climate factors controlled SOC and TN distribution pattern along the altitudinal belt. Moreover, the ratio of carbon to nitrogen ranged from 7.8 to 24.7, indicated a easier nutrients release to soil during the process of organic matter decomposition. Additionally, as the main forest component of Qilian Mountains, *Picea crassifolia* forests showed a mean soil carbon density of 18.13 kg/m^2 , which is similar to evergreen conifer forests, but much lower than spruce and fir families.

Key words Qilian Mountains; altitudinal belt; SOC; TN

《山地学报》来稿要求 (一)

1. 来稿如系国家和省级自然科学基金资助项目或国家、省部级重点 (专项资助) 项目, 请在首页脚注处标明项目名称和编号, 并译成对应英文, 以方括号括注附于中文后。

作者简介置于首页脚注处, 包括姓名 (出生年), 性别 (民族)、籍贯 (省市)、学位、职称、从事专业方向、联系电话、E-mail 等, 亦须译成对应英文附于中文作者简介后。

2. 来稿请寄计算机录入排版的打印样稿 2 份, 录入软件请用 Word 或北大方正 (书版)。来稿须符合本刊规定的正、辅文项目齐全的要求, 且位置正确。

3. 插图切勿过大, 图中文字数据等请按制图规范制作、标注。文稿中应标明插图位置, 并在图框下标明中、英文对照的图号、图题和图注 (图注置于图与图名之间)。表应有中、英文对应的表名, 对说明主题有重要价值的表内栏目亦请附对应英文名称。图、表宽度以 70 mm 或 150 mm 为宜, 表一般应为三线表。

4. 文稿中外文字母、符号必须分清大小写、正斜体、黑白体; 上下标的字母、数码和符号, 其位置高低应区分明显, 容易混淆的外文字母请用铅笔标注语种。文中计量单位必须采用国家法定计量单位符号表示。

5. 参考文献采用 GB7714-8 规定的“顺序编码制”, 按文中出现的先后为序编码并将序号置于方括号中放在引用处的右上角 (即上标)。参考文献类型及其标识代码根据 GB3469-83 的规定, 以字母方式标识, 它们是: 专著 [M], 期刊文章 [J], 论文集 [C], 论文集析出文献 [A], 报告 [R], 软件 [CP], 国家标准 [S], 报纸文章 [N], 学位论文 [D], 其他 [Z]; 联机网上数据库 (database online) [DB/OL]; 磁带数据库 [DB/MT]; 光盘图书 [M/CD]; 网上期刊 [J/OL]; 网上电子公告 [EB/OL]。