

网络出版时间:2012-12-21 17:30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20121221.1730.021.html>

# 西藏色季拉山东麓垂直带土壤碳氮分布特征及其影响因素

马和平<sup>a</sup>, 郭其强<sup>a</sup>, 刘合满<sup>b</sup>, 钱登锋<sup>b</sup>

(西藏农牧学院 a 高原生态研究所 b 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000)

**【摘要】** 【目的】研究西藏色季拉山东麓不同海拔高度下土壤碳、氮含量的变化规律, 以期为研究西藏色季拉山森林生态系统对全球气候变化的响应提供基础资料。【方法】采集西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度的土壤样品, 研究了表层(0~20 cm)土壤土壤体积质量、pH 以及有机碳、全氮及微生物量碳、氮含量在垂直带随海拔高度变化的特征, 并分析了不同生态因子对土壤有机碳、全氮及微生物量碳、氮含量的影响。【结果】随着海拔高度的上升, 土壤体积质量和 pH 值均呈现减小的趋势。不同植被下, 土壤有机碳和全氮及微生物量碳、氮含量表现为高山灌丛林 > 方枝柏林 > 杜鹃林 > 急尖长苞冷杉林, 且随着海拔的上升以上 4 个指标总体呈增加的趋势。土壤温度、湿度、pH 值和植被类型可能是调控土壤碳、氮沿海拔高度变化的主要生态因子。【结论】探明了西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度下土壤碳、氮的分布规律及其影响因素, 为西藏色季拉山森林生态系统的进一步研究奠定了基础。

**【关键词】** 有机碳; 微生物量碳、氮; 海拔梯度; 西藏色季拉山

**【中图分类号】** S153.6

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2013)01-0091-06

## Distribution and affecting factors of soil organic carbon and total nitrogen along the altitudinal belt in the eastern Sejila Mountain of Tibet

MA He-ping<sup>a</sup>, GUO Qi-qiang<sup>a</sup>, LIU He-man<sup>b</sup>, QIAN Deng-feng<sup>b</sup>

(a Research Institute of Plateau Ecology, b Faculty of Forest Resources and Environmental Science, Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 860000, China)

**Abstract:** 【Objective】 In order to better understand the responses of forest ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau to global climate change, variations of soil carbon and nitrogen in the sub-alpine in the eastern Sejila Mountain of Tibet were studied. 【Method】 The variation characteristics of soil bulk density, pH, soil organic carbon, total nitrogen, and soil microbial biomass C and N at the surface layer(0—20 cm) were conducted by the soil samples along the altitudinal belts in the eastern Sejila mountain of Tibet. The impact of different ecological factors on soil organic carbon, total nitrogen, and microbial biomass carbon and nitrogen content were analyzed as well. 【Result】 The paper showed that soil bulk density and pH decreased as the increase of elevation. SOC, TN, MBC and MBN increased as elevation increased and their contents among different vegetation were in the following order; Alpine shrub > *Sabina salutory* forest > *Rhododendron* forest > *Abies georgei* var. *smithii* forest. And those indicators increased as the increase of elevation. Soil temperature, humidity, pH and vegetation types were variable ecological factors which may regulate soil

**【收稿日期】** 2012-04-27

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目(41061033, 41161052); 国家林业局林芝森林生态系统定位研究项目

**【作者简介】** 马和平(1977—), 男, 甘肃陇西人, 讲师, 硕士, 主要从西藏高原生态和碳循环研究。E-mail: maheping2006@21cn.com

carbon and nitrogen along elevation. 【Conclusion】 The results proved the distribution and its influencing factors of soil carbon and nitrogen at different altitudes and laid the foundation for the further study of the forest ecosystems in the eastern Sejila Mountain of Tibet.

**Key words:** SOC; soil microbial biomass C and N; altitudinal belt; Sejila Mountain of Tibet

陆地生态系统碳储量在全球碳平衡中起着十分重要的作用<sup>[1]</sup>。土壤有机碳是全球碳循环中重要的碳库。据统计,土壤有机碳库是大气碳库的 3 倍,是植被的 2.5~3 倍<sup>[2]</sup>,为地球表层最大的有机碳库,是全球生物化学循环中极其重要的生态因子,因而土壤有机碳库的变化日益成为全球有机碳研究的热点<sup>[3]</sup>。随着全球有机碳库变化研究的深入,土壤碳库受到了普遍关注<sup>[4-5]</sup>。目前,我国土壤和环境学者已对土壤碳循环及土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放进行了研究<sup>[6-7]</sup>,结果表明,我国土壤有机碳库较为贫乏,且多集中在表层。近年来,随着计算技术的高速发展以及遥感、地理信息系统和全球定位系统的深入研究,为土壤有机碳含量研究提供了新的思路,也成为一些国家进行土壤调查的主要手段。

森林生态系统在全球碳循环过程中起着重要的作用。随着我国封山育林和天然林保护工程的实施,森林面积正逐步增加,我国森林尤其是西藏森林在全球碳平衡中的地位也发生了根本变化,但是目前还没有对我国森林尤其是西藏森林的碳汇作用进行量化研究的相关报道。研究西藏森林系统碳循环,确定其在碳循环中的地位,对于我国未来的碳排放(环境)政策的制定具有重要意义,也有利于为我国在国际间碳排放谈判中争取主动,为我国的经济争发展争取环境空间<sup>[8-10]</sup>。为此,本试验以西藏色季拉山为研究对象,分析了其东麓土壤碳氮分布格局及其与环境因子的关系,试图揭示亚高山寒温带山地土壤碳、氮的变化规律,以期研究西藏色季拉山森林生态系统对全球气候变化的响应提供基础资料,同时为探明青藏高原对全球气候变化响应的区域差异提供科学依据。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 研究区概况

色季拉山位于西藏东南部林芝县境内,地理位置为 29°10'~30°15'N,93°12'~95°35'E,是念青唐古拉山余脉与喜马拉雅山东部向北发展的山系结合部,处于半湿润区与湿润区的过度地带,海拔 2 200~5 300 m,面积约 2 300 km<sup>2</sup>。本研究区位于色季拉山(阳坡)东坡(约在 29°38'N,94°43'E),海拔

3 600~4 400 m,平均坡度 38°左右。由于雅鲁藏布江的水气通道作用,该区域受印度洋暖湿季风的影响,为亚高山寒温带半湿润区,年均温 -0.73 °C,最暖月(7 月)平均气温为 9.8 °C,最冷月(1 月)平均气温为 -13.8 °C;年降水量 1 134 mm;蒸发量 554 mm,占全年降水量的 30%;年平均相对湿度 78%。色季拉山土壤以山地棕壤和酸性棕壤为主。但由于不同坡向和不同海拔高度而形成的综合生态环境的差异,致使林下土壤的发生层次和理化性状差别显著,主要表现在发生层中有无灰化层、凋落层厚度、土壤含水率、有机质含量等方面。根据土壤形成环境与土壤性状及两者相互作用的综合特点,区域内的土壤可划分为海拔 4 800 m 以上的高山寒漠土、林线以上的高山草甸土、高山灌丛下的亚高山灌丛草甸土、高海拔冷杉林下的山地漂灰土和针阔混交林下的山地暗棕壤 5 种类型,土层平均厚度 60 cm,母岩以花岗岩为主。

在色季拉山,急尖长苞冷杉(*Abies georgei*) 在乔木层中占绝对优势,是构成群落外貌的主要建群种。土壤和植被随山地地形和气候的差异形成明显的垂直分布带。在海拔 3 300~3 600 m,以林芝云杉(*Rhododendron nyingchiense*)原始森林为主,郁闭度 0.7~0.8;川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)多为伴生树种,林下灌木以杯萼忍冬(*Lonicera inconspicua*)、柳叶忍冬(*Lonicera lenceolata*)、峨眉蔷薇(*Rosa omelensis*)、越桔忍冬(*Lonicera myrtillus*)、小舌紫菀(*Aster albescens*)、长芽绣线菊(*Spiraea longigemmis*)为主。在海拔 3 700~4 200 m,广布着急尖长苞冷杉原始森林,林下多为杜鹃属(*Rhododendron*)灌木,郁闭度随海拔高度增加而减小。在海拔 4 200~4 300 m,分布着方枝柏(*Sabina saltuaria*)原始森林。海拔 4 300 m 为林线,4 300 m 以上为高山灌丛,郁闭度较大,可达 0.9。

### 1.2 样地设置

研究区位于西藏色季拉山东坡(阳坡)海拔 3 700~4 340 m 地带。在不同海拔梯度设置了 8 个 20 m×30 m 的固定样地进行土壤有机碳研究(表 1)。对样地内株高≥1.5 m 的乔木树种进行每木检尺;下木、活地被物的调查样地按对角线法设置

(2 m×2 m),调查每个样方中株高<1.5 m 的乔木幼树年龄;统计灌木、草本(包括蕨类植物)和层间植物种类、株数(或丛数)、高度、盖度。

表 1 样地的基本状况和植被组成

Table 1 Basic condition and vegetation compositions of the sample plots

样地号 Plot No.	海拔/m Altitude	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	植被类型 Vegetation type	土壤类型 Soil type
1	4 340	29°39'25"	94°42'25"	34	东 East	高山灌丛 Alpine shrub	亚高山灌丛草甸土 Subalpine shrub meadow soil
2	4 300	29°39'13"	94°42'24"	42	东 East	方枝柏 <i>Sabina saltuaria</i>	山地漂灰土 Mountain drift soil
3	4 200	29°39'65"	94°42'31"	43	东 East	方枝柏 <i>Sabina saltuaria</i>	森林灰褐土 Grey-drab forest soil
4	4 100	29°39'64"	94°42'34"	42	东 East	杜鹃 <i>Rhododendron</i>	森林灰褐土 Grey-drab forest soil
5	4 000	29°39'02"	94°42'38"	39	东 East	急尖长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	森林灰褐土 Grey-drab forest soil
6	3 900	29°38'51"	94°42'36"	41	东 East	急尖长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	森林灰褐土 Grey-drab forest soil
7	3 800	29°38'52"	94°42'45"	38	东 East	急尖长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	森林灰褐土 Grey-drab forest soil
8	3 700	29°38'49"	94°42'59"	33	东 East	急尖长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	森林灰褐土 Grey-drab forest soil

1.3 土壤样品的采集与处理

2011-10,在每块标准地有代表性的部位,剔除地表凋落物与腐质殖层后,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀测定土壤体积质量,采集土壤表层(0~20 cm)土样约 200 g,分别装入自封袋中并做好标记。土样采集后,拣除石块等杂物后,每份土样又均匀分成 2 部分,一部分放入 4 °C 冰箱保存,用于测定土壤微生物量碳、氮;另一部分装在土样袋中,运回实验室自然风干,用于测定土壤有机碳和全氮。

1.4 测定指标及方法

土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾氧化法,全氮含量的测定采用凯氏定氮法。土壤微生物量碳、氮含量的测定采用氯仿熏蒸浸提法<sup>[11-12]</sup>,具体步骤为:准确称取 25.0 g 烘干土样 6 份,将土壤样品含水量调节到田间持水量的 50%,其中 3 份土壤样品用无水乙醇氯仿于 25 °C 熏蒸 24 h,然后取出,反复抽真空去除氯仿;另外 3 份不进行熏蒸处理,作为对照,然后用硫酸钾溶液浸提,浸提液中的碳用重铬酸钾氧化法测定;浸提液中的氮用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定。土壤 pH 值测定采用酸度计。

1.5 数据分析

利用 Excel 2003 软件制图,用 SPSS 11.5 For windows 统计软件对测定数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 西藏色季拉山东麓垂直带土壤体积质量、pH 值随海拔的变化

土壤体积质量即是单位容积原状土壤的干质量,它综合反映土壤的颗粒和空隙状况。图 1 显示,随着海拔高度的增加,研究区土壤体积质量和 pH 值均呈现出降低的趋势。

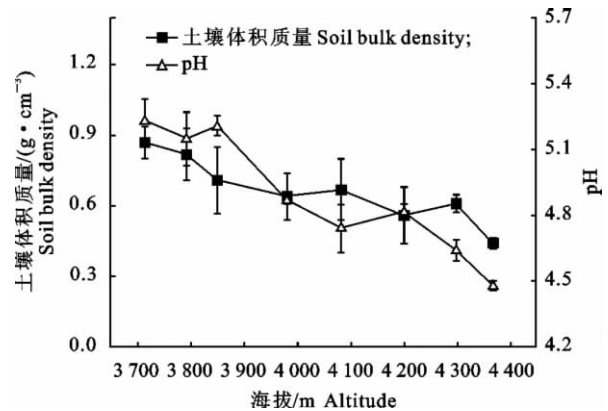


图 1 西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度下土壤体积质量和 pH 值的变化

Fig. 1 Soil bulk density and pH changes along an vertical elevation gradient in the eastern Sejila Mountain of Tibet

## 2.2 西藏色季拉山东麓垂直带土壤有机碳、全氮含量随海拔的变化

西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度下土壤有机碳和全氮含量的变化见图 2。图 2 表明,在色季拉山阳坡(东坡)垂直带上,表层(0~20 cm)土壤有机碳含量随海拔高度的上升总体呈增加的趋势,按照海拔高度其变化可以分为 3 700~4 000 m (I)、4 000~4 300 m(II)和 4 300 m 以上(III)3 个阶段。在 I 区间,海拔 3 700 m 处的土壤有机碳含量最低,为 31.312 g/kg,当海拔高于 3 700 m 时土壤有机碳含量明显增加,海拔 3 900 m 处达到峰值(63.583 g/kg),之后土壤有机碳含量呈递减趋势;在 II 区间,土壤有机碳含量也呈先增加后降低的趋

势,于海拔 4 200 m 处达到峰值(78.517 g/kg);当海拔高于 4 300 m 时,土壤有机碳含量迅速增加,并在海拔 4 340 m 处达到最高值(113.198 g/kg)。对不同植被类型而言,土壤有机碳含量由高到低为高山灌丛林(113.198 g/kg)>方枝柏林(78.517 g/kg)>杜鹃林(65.036 g/kg)>急尖长苞冷杉林(31.31 g/kg)。

土壤全氮含量变化与有机碳分布规律大体相同,即随着海拔上升,土壤全氮含量总体增加。从植被类型上看,高山灌丛土壤全氮含量最高(2.392 g/kg),其次是方枝柏林(2.261 g/kg)和杜鹃林(2.182 g/kg),急尖长苞冷杉林较低,为 1.011 g/kg。

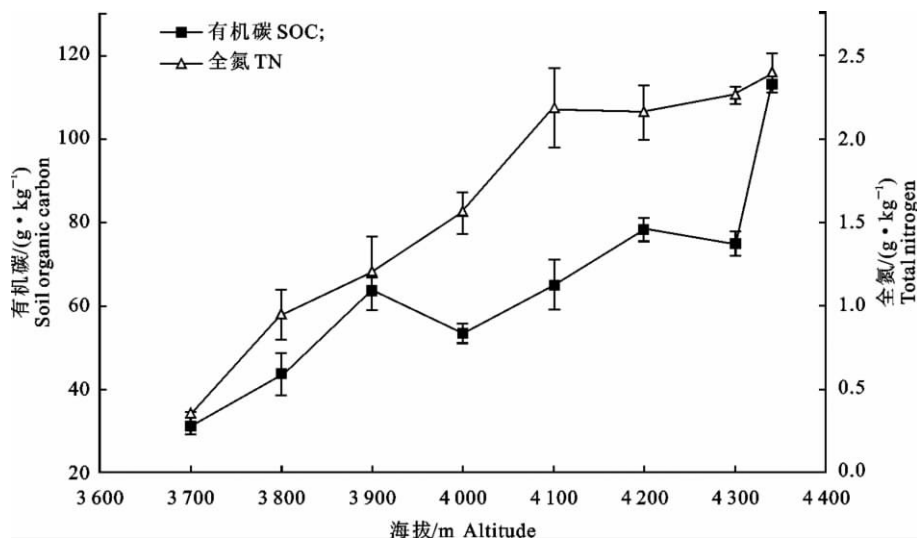


图 2 西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度下土壤有机碳和全氮含量的变化

Fig. 2 Changes of soil organic carbon and total nitrogen contents along an vertical elevation gradient in the eastern Sejila Mountain of Tibet

## 2.3 西藏色季拉山东麓垂直带土壤微生物量碳和氮含量随海拔的变化

西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度下土壤微生物量碳、氮含量的变化见图 3。图 3 表明,在色季拉山东麓垂直带上,表层(0~20 cm)土壤中微生物量碳含量均随着海拔的上升总体呈增加的趋势,这与杨金艳等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。当海拔为 3 700~4 000 m 时,土壤微生物量碳含量呈上升的趋势,在海拔 3 700 m 处土壤微生物量碳最低,为 132.504 mg/kg,在海拔 4 000 m 处土壤微生物量碳含量达到峰值(268.422 mg/kg);当海拔为 4 000~4 100 m 时土壤微生物量碳含量呈现下降的趋势,并在海拔 4 100 m 处达到最低值(245.828 mg/kg);在海拔 4 100~4 340 m 时,土壤微生物量碳含量呈

上升的趋势,在 4 340 m 达到最大值(409.795 mg/kg)。土壤微生物量氮含量的变化趋势与微生物量碳大体相似,即随着海拔的上升总体呈增加的趋势。在海拔 4 200 m 以下土壤微生物量氮含量的变化幅度较小;在海拔 4 200 m 以上,土壤微生物量氮含量迅速增加。可见,海拔对土壤微生物量碳、氮含量有明显影响。

从植被类型上看,高山灌丛土壤微生物量碳含量最高(409.795 mg/kg),其次是方枝柏林(347.265 mg/kg)和杜鹃林(245.828 mg/kg),急尖长苞冷杉林最小(132.504 mg/kg);土壤微生物量氮含量变化趋势为高山灌丛林(159.003 mg/kg)>方枝柏林(142.132 mg/kg)>杜鹃林(28.684 mg/kg)>急尖长苞冷杉林(17.637 mg/kg)。

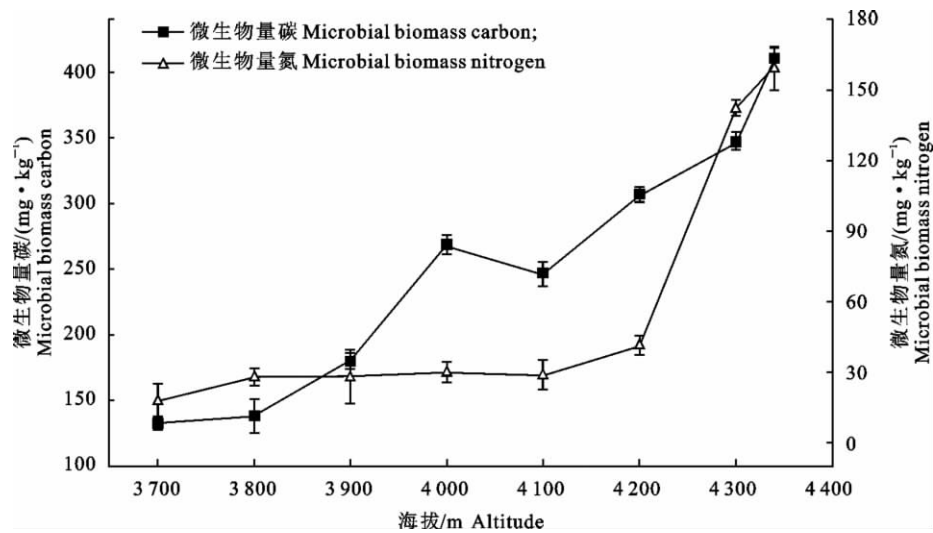


图 3 西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度下土壤微生物量碳、氮含量的变化

Fig. 3 Changes of microbial biomass carbon and nitrogen along an vertical elevation gradient in the eastern Sejila Mountain of Tibet

### 3 讨 论

#### 3.1 不同海拔高度下土壤有机碳、全氮含量的变化及其与主要生态因子的关系

3.1.1 土壤温度、湿度 由于色季拉山所处的独特地理位置和气候条件,水分供应的类型主要为冰雪消融及大气降水,导致该地区土壤水分含量较高,使高山灌丛林、方枝柏林、杜鹃林和急尖长苞冷杉林等植被的土壤水分在全年的供应比较充足。在色季拉山原始森林阳坡,随着海拔的上升,土壤水分含量呈现上升趋势<sup>[14]</sup>。这一方面是由于随着海拔的上升,大气降水增加,土壤变得相对湿润;另一方面,高海拔地区季节性冻土分布比较普遍,随着生长季气温的逐步升高,冻土融化的水分使得土壤水分含量保持较高的水平。低海拔地区的土壤温度高于高海拔地区,而土壤湿度与之相反。在低海拔地区,土壤温度对微生物活性的影响占主导地位,土壤温度越高,微生物活性越强,土壤有机碳被大量分解形成  $\text{CO}_2$  释放到大气中,从而使得土壤有机碳含量较低。在西藏色季拉山高山灌丛林地带(高海拔地区),土壤温度低而含水量偏高,土壤微生物活性趋于缓慢,植物凋落物很难被微生物分解而沉积下来进入到土壤中,从而使该区域土壤有机碳含量较高。这与一些学者的研究结果<sup>[15-16]</sup>相一致。

3.1.2 植被类型 本研究结果表明,西藏色季拉山东麓不同植被类型土壤有机碳和全氮含量随海拔高度的升高变化比较明显。究其原因是由于:不同海

拔高度下西藏色季拉山东麓的植被类型、土壤湿度、温度差异明显,而植被凋落物作为不同生态系统的土壤有机碳来源,其分解率与土壤水分、地表温度呈正相关<sup>[17]</sup>,所以不同海拔高度下不同植被类型的土壤有机碳和全氮含量在不同海拔差异明显。

3.1.3 土壤 pH 值 本研究结果表明,在西藏色季拉山东麓,随着海拔高度的降低,表层(0~20 cm)土壤有机碳含量逐渐减小,而 pH 逐渐增大。土壤 pH 可以影响微生物的生长和活动,在 pH 较低的土壤中,微生物以真菌为主,其他种类微生物的作用受到限制,抑制了微生物对有机质的分解,从而使得植物物质的分解减缓,土壤有机碳含量减小;在 pH 较高的土壤中,有机物质的溶解、分散和化学水解作用会增强,从而提高了微生物对有机物质的利用率,导致土壤有机碳易于分解,故其含量降低。

#### 3.2 不同海拔高度下土壤微生物量碳、氮的变化及其与主要生态因子的关系

本研究结果表明,在西藏色季拉山东麓垂直带上,表层(0~20 cm)土壤有机碳、全氮含量与海拔高度呈正相关关系,这与前人的研究结果<sup>[18-20]</sup>一致。随着海拔的升高,土壤微生物量碳、氮含量也逐渐增大。可知土壤有机碳含量越高,土壤微生物量碳越大,表明土壤有机碳对土壤微生物量碳起着关键作用。土壤微生物在进行自身合成与代谢过程中,除了利用碳源以外,还要吸收一定量的氮以完成这一过程,因此土壤微生物量氮含量与土壤全氮含量呈正相关关系。

以上分析表明,西藏色季拉山东麓垂直带不同海拔高度下,土壤温度、湿度、pH 值和植被类型可能是调控土壤碳、氮变化的主要生态因子。

## 4 结 论

1)在西藏色季拉山东麓,随着海拔高度的升高,表层(0~20 cm)土壤体积质量和 pH 值均呈下降的趋势。

2)在西藏色季拉山东麓垂直带上,表层(0~20 cm)土壤有机碳和全氮以及土壤微生物量碳、氮含量均随着海拔的升高呈增加的趋势。

3)在西藏色季拉山东麓的垂直带,土壤温度、湿度、pH 值和植被类型可能是调控土壤碳、氮沿海拔高度变化的主要生态因子。

### [参考文献]

- [1] 赵俊芳,延晓冬,贾根锁. 基于 FORCCHN 的未来东北森林生态系统碳储量模拟 [M]. 地理科学,2009,29(5):690-696.  
Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Simulation of carbon stocks of forest ecosystems under the future climatic scenario in northeast China based on FORCCHN [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(5): 690-696. (in Chinese)
- [2] Post Wilfred M, Peng Tsung Hung, Emanuel William R, et al. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. Global Change Biology, 2000, 6: 317-328.
- [3] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对土壤碳库的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 217-222.  
Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on soil carbon [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 217-222. (in Chinese)
- [4] Kimble J M, Levine E R. The Nairobi Conference: Topics, results, and research needs [C]//Trans 15th World Conf Soil Sci. Acapulco, Mexico: [s. n.], 1994: 151-162.
- [5] Lal R, Kimble J M, Stewart B A. World soils as a source or sink for radiatively-active gases [M]//Lal R, Kimble J M, Levine E, et al. Soil management and green house effect. Boca Ration; Lewis Publ, 1995: 1-8.
- [6] 徐 琪, 杨林章, 董元华. 中国稻田生态系统 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.  
Xu Q, Yang L Z, Dong Y H. Paddy ecosystem of China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. (in Chinese)
- [7] Pan G, Tao Y X, Teng Y Z, et al. Some teatures of carbon cycling in kart system and the implication for epikaritif-artion [J]. J Chin Geog, 1997, 7(3): 48-57.
- [8] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.  
Wang X K, Fen Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 13-16. (in Chinese)
- [9] 康惠宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林 C 汇功能基本估计 [J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 230-234.  
Kang H N, Ma Q Y, Yuan J Z. Estimation of carbon sink function of forests in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 230-234. (in Chinese)
- [10] 聂道平, 徐德应, 王 兵. 全球碳循环与森林关系的研究: 问题与进展 [J]. 世界林业研究, 1997(5): 33-40.  
Nie D P, Xu D Y, Wang B. The relation between global CO<sub>2</sub> balance and forests: Problems and developments [J]. World Forestry Research, 1997(5): 33-40. (in Chinese)
- [11] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. Soil Bio Bio Chem, 1985, 17: 837-842.
- [12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Bio Biochem, 1987, 19: 703-707.
- [13] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量 [J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2875-2882.  
Yang J Y, Wang C K. Soils carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. Acta Ecology Sinica, 2005, 25(11): 2875-2882. (in Chinese)
- [14] 王景升, 任青山. 藏东南高海拔林分类型与土壤养分状况研究 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(增刊): 1-6.  
Wang J S, Ren Q S. Studies on forest type and soil nutrient status of high altitude area in Southeast Tibet [J]. Forest Research, 2003, 16(S1): 1-6. (in Chinese)
- [15] Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri [J]. Ecology, 1971, 52: 912-915.
- [16] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q10 [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 154-164.
- [17] Post W M, Izaurralde R C, Mann L K, et al. Montoring and verifying changes of organic carbon in soil [J]. Climate Change, 2001, 51: 73-99.
- [18] Roy A, Singh K P. Dynamics of microbial biomass and nitrogen supply during primary succession on blast furnace slag dumps in dry tropics [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3): 365-372.
- [19] Ghosh A K, Bhattacharyya P, Pal R. Effect of arsenic contamination on microbial biomass and its activities in arsenic contaminated soils of Gangetic West Bengal, India [J]. Environment International, 2004, 30(4): 491-499.
- [20] Yuan B C, Li Z Z, Liu H, et al. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(2): 319-328.