

文章编号: 1008-2786-(2017)5-629-07

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000261

贡嘎山海螺沟冰川退缩区植被演替过程的碳动态

罗 辑¹, 李 伟^{1*}, 余 佳², 何咏梅^{1,3}, 高嘉宁^{1,3}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

2. 成都市环境保护科学研究院, 成都 610031; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在贡嘎山海螺沟冰川退缩区植被原生演替序列不同演替阶段设置 7 个样地, 分别对 7 个样地的环境因子进行连续观测试验, 对各个样地的植物、土壤碳、粗木质物残体的有机碳含量进行测定。结果表明: 原生演替序列 7 个样地的有机碳储量分别为: 889.3, 8930.3, 13902.5, 17021.5, 19699.9, 26121.9, 34587.4 g C · m⁻²。样地的有机碳储量按大小顺序排列为: 植被 > 土壤 > 粗木质物残体。7 个样地的土壤呼吸 C 排放分别是 326.7, 265.7, 260.3, 382.5, 555.6, 774.9, 1030.5 g C · m⁻² · a⁻¹。在未来气候变化情景模式下, 不同演替阶段林分的土壤呼吸量均随着温度的增加而增加, 演替初期生态系统的土壤呼吸季节模式会发生显著变化, 对气候变化更加敏感, 演替后期的变化较小。植被原生演替序列总有机碳储量呈现持续增加的趋势, 在演替中后期碳汇作用变强。

关键词: 海螺沟; 冰川退缩区; 原生演替; 有机碳储量

中图分类号: P931.4, P463.22

文献标志码: A

碳循环对全球气候变化有着重要作用, 碳循环过程是认识地球系统和全球气候变化的关键环节。20 世纪 90 年代初, IGBP 发起成立了“全球变化与陆地生态系统 (GCTE)”核心计划, 在全球范围内建立了全球变化的 15 条陆地样带, 揭示了区域和全球尺度上全球变化对主要陆地生态系统的影响, 在陆地生态系统生产力、碳循环与生态系统功能与结构等方面获取了全球变化与生态系统相互作用的丰富信息^[1, 2]。当前开展的全球碳计划 (Global Carbon Project, GCP), 是全球范围内进行碳循环研究合作和交流的主要平台, 在碳的源汇时空分布格局, 碳循环的人为与非人为控制和反馈机制, 以及未来全球碳循环的动力学方面进行了深入研究。

北极区和北方地区在目前碳循环研究中非常重要, 但是高纬地区年碳通量的不同估算值间有很大

的差异。如果没有准确的对北极区和北方地区生态系统目前的碳通量进行估计, 那么将难以预测这些生态系统对全球变化的响应。Hobbie 等认为在北方地区控制碳贮量和周转的独特生态因子容易被忽视, 如北方生态系统的优势种是苔藓植物。北方的寒冷天气、永久冻土带、水涝和土壤基质影响了土壤有机质的稳定性, 它们的相互关系很重要, 对气候变化的响应也是未知的。一些景观尺度的过程, 如火、永久冻土带动态和排水控制区域碳通量, 这些都使样地尺度的研究难以推演到区域尺度^[3]。目前在估算土壤碳储量, 特别是土壤碳储量变化方面仍然是不准确的, 测量土壤碳储量需要长期观测。通常由于选取的一些样点没有统计意义上的代表性, 而使这种测量的结果难以在更大尺度上应用。

在植被的演替过程中, 碳循环和碳储量在每个

收稿日期 (Received date): 2017-06-21; **改回日期** (Accepted date): 2017-10-13

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划 (2017YFC0504900); 中国科学院关键技术人才项目和国家自然科学基金 (41771062) [National key research and development program of China (2017YFC0504900); CAS Key Technology Talent Program and the National Natural Science Foundation of China (41771062).]

作者简介 (Biography): 罗辑, 男 (1960-), 江苏南京人, 研究员, 主要从事生态与环境研究 [Luo Ji (1960-), male, born in Nanjing, Jiangsu province, mainly engaged in the ecology and environment research.] E-mail: luoji@imde.ac.cn

* **通讯作者** (Corresponding author): 李伟, 男 (1969-), 四川南充人, 高级工程师, 主要从事山地生态与环境研究 [Li Wei (1969-), male, born in Nanchong, Sichuan province, Senior Engineer, works mainly on mountain ecology and environment.] E-mail: liwei@imde.ac.cn

阶段不同,而且也呈现相应的空间变化规律^[4,5]。Lieth 收集了关于森林次生演替与 NPP 关系的研究资料,揭示了森林演替过程与固碳的关系^[6]。Chapin 等人推测了植被演替与 NPP、植被碳储量与土壤碳储量等方面的关系,极大地启发了人们对生态系统碳循环的认识^[7]。证明 Chapin 等人的推测,在理论和实践中都非常重要,原生演替是证明 Chapin 等人的推测的重要途径。目前在冰川退缩区、流动沙地以及湖岸边开展了植被原生演替中碳动态的大量研究工作^[8-10],由于缺乏对序列连续性和完整性的研究,就有人对原生演替理论持怀疑态度^[11]。

海螺沟冰川退缩区植被演替序列具有连续性和完整性,有利于研究冰川退缩区植被演替过程的碳动态,探索植被演替过程生态系统的碳循环。

1 实验地概况和研究方法

本研究区为贡嘎山海螺沟冰川退缩区(图1)。该地区气候湿冷,属于山地寒温带气候类型。海螺沟冰川为季风海洋性冰川,水热条件好,冰川消融速度快,近百年来没有冰进过程,土壤有连续成土过程。

海螺沟冰川自小冰期开始退缩^[12],20 世纪 30 年代退缩加速。在冰川退缩区,沿冰川河约 2 km 范围内,形成了具有完整性和连续性的原生演替序列。在此序列范围内,生态因子变化小、人为干扰很小,有利于研究冰川退缩区植被演替过程的碳动态。本研究在对植被原生演替序列全面观测和调查的基础上,选择序列中 7 个典型的演替阶段进行比较。

从 1993 年开始,每年测定海螺沟冰川末端的位置,调查冰川末端植被和土壤。按照森林调查的方法,测定样地各层次植物生物量以及其年变化。每个演替阶段林下放置了 10 个 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 的收集框,每月采集林下调落物。分层次取土壤样品,植物样品分不同种类和不同层次采用,送样分析各个样品的 C 素含量。

土壤呼吸主要采用美国产 Li-6400-9 进行观测,在每月的月初和月中进行测定,采用美国产 CI-301 作为对照观测,每个季节对土壤呼吸速率的日变化进行测定,同时测定相关生态因子。

2 结果与分析

2.1 植被原生演替过程

冰川退缩形成的原生裸地,在第 4 年就有被子植物生长发育,有固氮作用马河山黄芪(*Astragalus mahoshanicus*)、直立黄芪(*A. adsurgens*)开始生长,先锋木本植物冬瓜杨(*Populus purdomii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和多种柳树(*Salix* spp.)进入原生裸地。最初群落的植物比较稀疏(样地1),黄芪和沙棘的固氮作用不断增加,改善了局部生境。植物密度增加,形成先锋树木占优的小树群落(样地2)。由于冬瓜杨光合速率高,生长最快,引起种间竞争加剧,沙棘和多种柳树生长较慢,大部分死亡,少部分在群落中残存(样地3),郁蔽的生境有利于赖阴植物的种子萌发,糙皮桦(*Betula utilis*)、麦吊杉(*Picea brachytyla*)和峨眉冷杉(*Abies fabri*)依次在群落出现,形成新的层次。由于冬瓜杨的密度较大,自疏作用显著,沙棘受压明显,其次是多种柳树,形

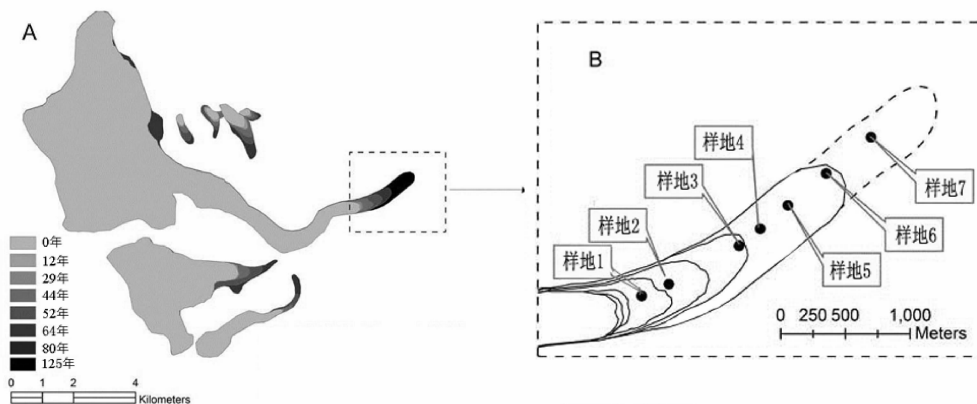


图1 研究区位与样点布设。A 为海螺沟冰川区,B 为海螺沟冰川退缩区样地位置

Fig. 1 Study location and sampling plots. A is Hailuoguo glacial area, B is sampling plot in glacial shrinking area

成冬瓜杨成熟林(样地 4)。这时土壤发育加快,由碱性变为酸性土壤,云冷杉逐步成为群落优势种(样地 5),冬瓜杨生长受压,大量死亡,在林窗和林缘的冬瓜杨还能保持生长(样地 6)。冬瓜杨的死亡,形成一些林窗,生物多样性增加,群落层次丰富,形成主林层是云冷杉的群落(样地 7)。在 125 年时,植物群落的生物量和生产力已经非常高,接近顶级群落。但是,此时的土壤还在发育,B 层还没有形成。在原生演替过程中,生物参与土壤形成的过程非常明显。

陆地植被原生演替过程中氮素和光是主要的限制因子^[13],海螺沟冰川退缩区水热条件配合好,植物固氮作用强,植被演替速度快。海螺沟 125 年形成的原生演替序列,在阿拉斯加冰川退缩区需要经过 180 年才能形成,阿拉斯加冰川退缩区的植被原生演替序列没有明显的连续性和完整性。

2.2 原生演替过程中土壤有机碳积累

碳、氮主要通过植物的光合作用和固氮作用从大气中进入到生态系统中的,在演替过程中植物的粗木质物残体、凋落物等是土壤有机碳和氮的主要来源,微生物的分解作用与碳氮比有着密切关系。随着演替的进行,海螺沟冰川退缩区植被演替序列的土壤迅速积累有机碳和氮,表层土壤变厚,土壤腐殖化程度增加,氮矿化速率加速,C:N 比值减小。土壤 A₀ 层和 A 层全碳、全氮含量均随演替进行先增加而后趋于稳定(图 2),C:N 比值随演替进行逐渐减小。

经过 125 年演替的冰川退缩区土壤表层全碳含量,与贡嘎山海拔 3000 m 的峨眉冷杉成熟林的土壤非常相近(表 1)。全氮含量略低,C:N 比值较高。土壤经过 125 年的发育,表层主要营养元素含量已接近成熟林水平,特别是碳。整个土壤序列上,C:N 比在 13.5~22.8 之间,处于贡嘎山东坡土壤碳氮比范围之内,低于微生物分解的最佳值。

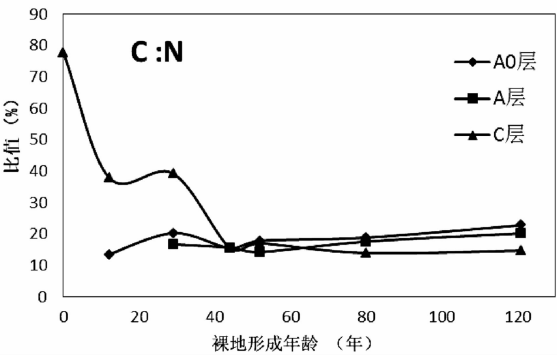


图 2 原生演替中土壤的 C:N 比
Fig. 2 C:N in soil during primary succession

由于演替过程植物竞争激烈,土壤各层次全碳、全氮含量变化较大。C 层全碳、全氮含量变化均表现为从底质开始,随着土壤的发育和演替的进行,含量增加缓慢。土壤 C 层全碳、全氮含量均明显低于 A₀ 层和 A 层。演替进展到在 29 年和 52 年时,先后有柳树和冬瓜杨大量死亡,土壤 C 层含量有一定量的增加。

与贡嘎山海螺沟 3000 m 峨眉冷杉成熟林土壤 C 层含量相比,冰川退缩区 125 年土壤 C 层全碳、全氮含量较低,全磷含量相当,C:N 比值也较小,C:P、N:P 比值很低。冰川退缩区 121 年土壤与海螺沟 3000 m 处土壤的成土母质相同,是 P 含量相近的主要因素,同时也表明植物对土壤 C 层磷的作用有限。冰川退缩区 121 年土壤 C 层全碳、全氮含量较低,是造成 C:P、N:P 比值低的原因。这一切表明,土壤 C 层发育不完善,土壤发育还在进行。

2.3 生态系统有机碳储量

原生演替序列 7 个样地的有机碳储量分别为: 889.1 ± 192.4, 8930.3 ± 1782.2, 13 902.5 ± 3260.1, 17 021.5 ± 4476.8, 19 699.9 ± 4041.7, 26 121.9 ± 7246.0, 34 587.4 ± 11 320.6 g C · m⁻²。海螺沟冰川退缩区植被演替序列的植物群落、粗木质物残体、土壤中有机碳储量均随着演替进程而呈现一定规律变

表 1 冰川退缩区 125 年土壤与峨眉冷杉成熟林主要营养元素含量比较

Table. 1 Comparison of main nutrient contents between 125 year old soil and *Abies fabri* mature forest in glacier shrinking area

土壤分层	TC (%)		TN (%)		P (mg · kg ⁻¹)		C : N		C : P		N : P	
	121 年 土壤*	参照 土壤 ^a	121 年 土壤*	参照 土壤 ^a	121 年 土壤*	参照 土壤 ^b	121 年 土壤	参照 土壤	121 年 土壤	参照 土壤	121 年 土壤	参照 土壤
表层平均 (A ₀ 、A 层)	26.63	27.03	1.17	1.52	964	1312	22.80	17.80	257.60	206.00	11.30	11.60
C 层	0.58	10.70	0.04	0.54	1194	1237	14.70	19.80	4.80	86.50	0.30	4.40

* 本研究; a 王琳等, 2004^[14]; b 吴艳宏等 2012^[15]

化,三者之间存在着密切关系(图3)。从先锋植物侵入原生裸地开始,植被演替系列有机碳储量持续增加,125年的样地的植物群落有机碳为 $19852.1 \pm 7186.3 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,已经接近贡嘎山峨眉冷杉成熟林的有机碳储量^[14]。

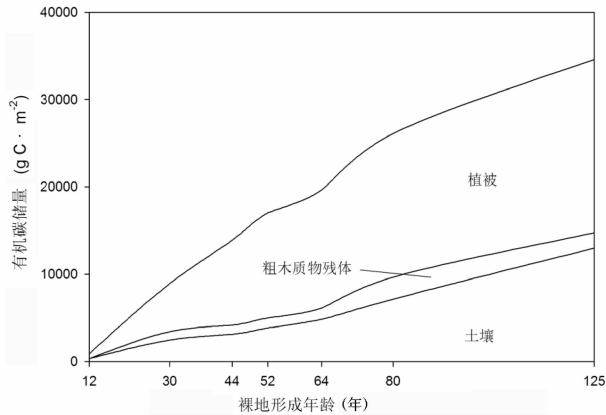


图3 海螺沟冰川退缩区生态系统各组分有机碳储量

Fig. 3 Organic carbon storage of different ecosystem parts in Hailuoguo glacial shrinking area

植物群落光合作用增强,使得有机碳储量在各个阶段显著增长。不同阶段的优势种群在碳积累方面表现非常突出,演替过程中种间和种内斗争也表现在群落内的有机碳分配方面,导致粗木质物残体大量产生,而且在各个阶段变化明显。其于30~80年增长迅速,在冬瓜杨大量死亡后的样地6达到最大值 $2517.6 \pm 1079.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,125年后,经过连续分解,只存留一部分。原生演替产生的大量粗木质物残体以及其在土壤发育的重要作用,这是海螺沟冰川退缩区植被原生演替的一个显著特征。

从冰川退缩形成的原生裸地开始,植被演替进程中伴随着森林土壤的形成。粗木质物残体、凋落物以及细根的分解,不断向土壤输入有机碳,导致土壤有机碳不断增加,对土壤形成有着重要作用,根系的分泌物也有着一定作用。在土壤发育初期的样地1,植物群落生物量低,凋落物较少,粗木质物残体非

常少。有机碳向土壤输入量少,土壤碳储量仅为 $318.2 \pm 45.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,125年(样地7)的土壤碳储量增加到 $12987.1 \pm 3437.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,为样地1的41倍,与贡嘎山峨眉冷杉近熟林的土壤有机碳储量相近^[16],略低于我国森林土壤平均碳素密度和世界土壤平均碳素密度^[17]。经过125年的原生演替,植物群落已经发展到接近顶级群落,但是土壤还没有达到顶级群落的状态。

生态系统中各组成部分的有机碳储量按大小顺序排列为:植被>土壤>粗木质物残体(图2,表2)。在样地编年序列的整个生态系统中,植被层的有机碳储量占生态系统有机碳储量比例一直比较高,只是到样地7有所下降,为57%。粗木质物残体有机碳储量占生态系统有机碳储量的比例始终在10%以下,其并不是一个主要的储存体,但是,它是森林生态系统碳循环的联结库,对森林生态系统的碳循环起着重要作用,在原生演替过程中尤为显著。土壤有机碳储量占生态系统有机碳储量的比例较低,一直到样地7才有所上升。据估计,全球森林地上部分碳储量与地下部分碳储量之比约为1:2^[18],而样地7森林地上部分碳储量超过50%。演替进展到125年,群落生物量已经接近顶级群落,但是,土壤发育还在进行。在随后很长一段时间内,主要通过凋落物和粗木质物残体向土壤输入有机物,土壤的有机碳将不断积累,原生演替过程碳汇作用显著。

2.4 土壤C排放

2.4.1 土壤呼吸

根据观测数据,计算了7个样地每月平均土壤呼吸值(图4)。7个样地的土壤呼吸空间变化的模式大致相同。土壤呼吸表现出相似的单峰型,生长期比非生长期土壤呼吸明显增强。土壤呼吸月平均值最低在样地1,1月仅为 $0.32 \pm 0.1 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而月平均值最高是样地7,7月土壤呼吸达 $6.25 \pm 0.9 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。演替序列不同

表2 土壤、粗木质物残体、植被有机碳储量占生态系统总有机碳的比例(%)

Table 2 Ratio of C storage between different parts of ecosystem (%)

裸地形成年龄 Age of exposed shrinking area		12	29	44	52	64	80	125
土壤 Soil		35.8	29.3	22.5	22.0	24.7	27.4	37.5
粗木质物残体 CWD		0	5.0	7.5	7.7	6.7	9.6	5.1
植物 Vegetation		64.2	65.7	70.0	70.3	68.6	63.0	57.4

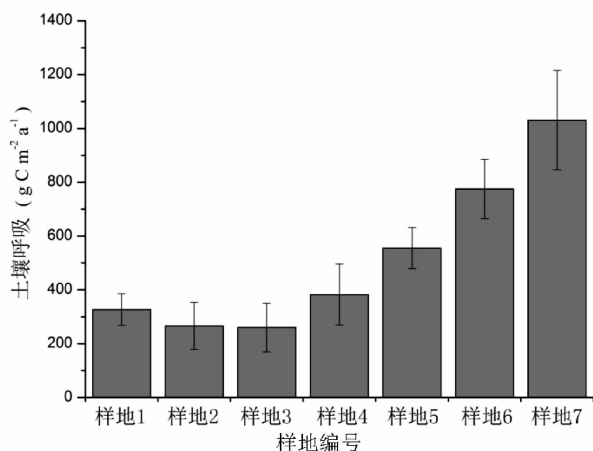


图4 土壤呼吸月平均值

Fig. 4 Monthly average soil respiration

阶段的土壤呼吸强度存在着明显的差异。

植被原生演替序列7个样地的土壤呼吸C排放分别是 326.8 ± 58.7 , 265.7 ± 87.2 , 260.3 ± 90.2 , 382.5 ± 113.4 , 555.6 ± 76.8 , 774.9 ± 109.9 , $1030.5 \pm 184.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。冰川退缩初期形成的裸地无 CO_2 释放,随植被演替的进展和土壤的发育,土壤中碳储量迅速升高,根系生理代谢作用加强,生态系统内部环境条件变化幅度减小,土壤排放 CO_2 的通量升高,其季节变化有升高的趋势。

2.4.2 气候变化情景下土壤碳排放的动态模拟

由于土壤 CO_2 的释放具有较大的空间异质性^[19, 20],并且会随着日、季节、年时间尺度而改变,使得对土壤 CO_2 释放的准确量化十分困难,对区域土壤的C排放估算形成一定的误差^[21, 22]。

目前,运用模型估计土壤 CO_2 释放通量是一个重要手段。贡嘎山海螺沟冰川退缩区发育有完整的植被原生演替序列,是研究土壤呼吸时间和空间异质性的理想区域。在这一典型区域利用 Forest-DNDC 模型可以模拟未来气候变化对不同演替阶段土壤呼吸的影响,以加深原生演替过程碳动态的理解。选取样地2、5、7分别代表演替的初期、中期和末期。

通过采用不同演替阶段的土壤呼吸实测数据,验证 Forest-DNDC 在冰川退缩区的模拟的效果。模型所需数据包括气象数据、植被数据和土壤数据等,气象数据来自贡嘎山 3000 m 森林生态观测试验站实测数据。结果表明(图5),Forest-DNDC 较好的模拟了冰川退缩区的三个阶段的土壤呼吸 ($R_{S1}^2 = 0.61$, $R_{S2}^2 = 0.69$, $R_{S3}^2 = 0.73$),该模型在本研究区有

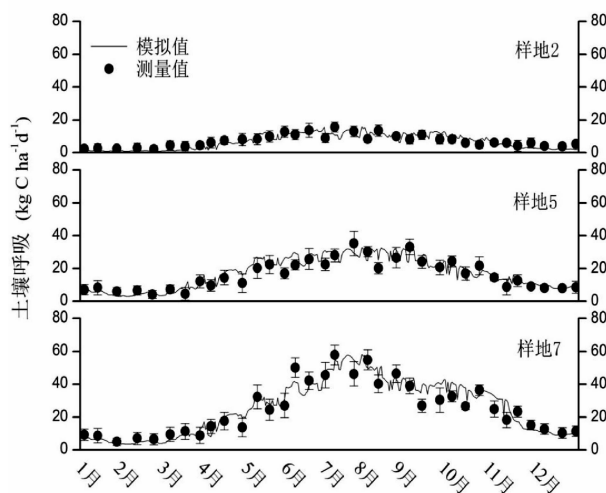


图5 土壤呼吸实测值和模型模拟值

Fig. 5 Measured values and model simulation values of soil respiration

较好的适用性。

温度和土壤呼吸之间关系的研究已有大量的报道,气候变化对各个演替阶段土壤呼吸的影响程度是不同的。按照 IPCC 预测的未来气候变化的情景,在温度升高 1.8、2.4、3.8℃时,演替初期土壤C排放比目前分别高 18.6%、25.2% 和 32.7%;在演替中期,分别高 13.4%、17.7% 和 21.2%;在演替末期,分别高出 11.4%、15.7% 和 18.7%。上述结果表明,冰川退缩区植被原生演替初期群落的土壤呼吸季节模式将会发生显著变化,对气候变化更加敏感。在未来气候变化情景模式下,三个演替阶段的土壤呼吸量均随着温度的增加而增加。

3 结语

森林生态系统碳库是陆地生态系统碳库的主体,维持着陆地生态系统植被碳库的 86% 和土壤碳库的 73%,每年所固定的有机碳量约占整个陆地生态系统固碳量的 2/3,森林碳库发生细微的变化就会对全球气候系统产生巨大的影响^[23]。原生演替在全球范围都有发生,其各个阶段生物和环境因素的作用都至关重要。对原生演替的深入研究,可以更好的理解和应用生态学原理,指导生态恢复和重建^[24]。海螺沟冰川退缩区,水热条件较好,演替速度快,原生演替碳动态反映了其格局与过程的特征。

在原生演替过程中,生态系统总有机碳储量呈现持续增加的趋势,在演替中后期碳汇作用增强。125 年的生态系统总碳储量已达 $34\,587.4 \text{ g C} \cdot$

m^{-2} , 其值高于我国森林生态系统平均碳储量 $25\,880\text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于我国针叶林生态系统的平均碳储量 $40\,800\text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间^[25]。在演替后期植物群落的碳增加幅度不大时, 土壤有机碳储量还将继续增加, 土壤有机碳储量增加的周期还很长^[26, 27]。

原生演替过程群落生物量随时空而变化非常显著, 在时间上, 群落生物量通常随林龄而迅速增加, 在顶级群落时群落生物量成分和数值都达到稳定值; 在空间上, 生物量成分和数值随着演替的生境条件、群落组成的改变而变化。一般来说, 原生演替过程群落生物量前期和中期时空变化较大, 后期变化较小。原生演替过程中种内、种间竞争激烈, 产生大量粗木质物残体, 在土壤表层逐步分解, 对土壤的形成和有机碳积累发挥着重要作用。因此, 在土壤取样和测定土壤呼吸时, 必须特别注意土壤表层附近的不稳定碳库的变化^[28]。

土壤呼吸排放的碳是一个重要的碳源^[29], 海螺沟冰川退缩区植被原生演替序列土壤呼吸排放的碳量在不断增加, 与此同时原生演替序列的 GPP 和 NPP 也在增长, 所以在原生演替过程总体表现为碳汇作用。在未来气候变化情境下, 演替前期土壤碳排放影响较大, 对后期影响较小。

参考文献 (References)

- [1] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲. 全球变化与中国东北样带 (NECT) [J]. 地学前缘, 2002, **1**(9): 198–216 [ZHOU Guangsheng, WANG Yuhui, JIANG Yanling. Global change and water-drive IGBP-NECT, northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2002, **1**(9): 198–216]
- [2] 李家洋, 陈泮勤, 马柱国, 等. 区域研究: 全球变化研究的重要途径[J]. 地球科学进展, 2006, **21**(5): 441–450 [LI Jiayang, CHEN Panqin, MA Zhuguo, et al. Regional research: a main approach to understanding the global environmental change[J]. Advances in Earth Science, 2006, **21**(5): 441–450]
- [3] HOBIE S E, SCHIMEL J P, TRUMBORE S E, RANDERSON J R. Controls over carbon storage and turnover in high - latitude soils [J]. Global Change Biology, 2000, **6**(S1): 196–210.
- [4] GOUGH C M, VOGEL C S, HARROLD K H, GEORGE K, CURTIS P S. The legacy of harvest and fire on ecosystem carbon storage in a north temperate forest [J]. Global Change Biology, 2007, **13**(9): 1935–1949.
- [5] BECHTOLD J S, NAIMAN R J. A quantitative model of soil organic matter accumulation during floodplain primary succession [J]. Ecosystems, 2009, **12**(8): 1352–1368.
- [6] LIETH H. Primary productivity of successional stages [M]. Springer. 1974: 185–193.
- [7] CHAPIN F s, MATSON P A, VITOUSEK P M. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. Springer. 2002.
- [8] LIN H J, HUANG C H, HWANG G W, et al. Hydrology drives vegetation succession in a tidal freshwater wetland of subtropical Taiwan [J]. Wetlands, 2016, **36**(6): 1109–1117.
- [9] JOHNSON E A, MARTIN Y E. A biogeoscience approach to ecosystems [M]. Cambridge University Press. 2016: 435.
- [10] CASTLE S C, LEKBERG Y, AFFLECK D, et al. Soil abiotic and biotic controls on plant performance during primary succession in a glacial landscape [J]. Journal of Ecology, 2016, **104**(6): 1555–1565.
- [11] JOHNSON E A, MIYANISHI K. Testing the assumptions of chronosequences in succession [J]. Ecology Letters, 2008, **11**(5): 419–431.
- [12] HEIM A. The glaciation and solifluction of Minya Gongkar [J]. The Geographical Journal, 1936, **87**(5): 444–450.
- [13] CROCKER R L, MAJOR J. Soil development in relation to vegetation and surface age at Glacier Bay, Alaska [J]. The Journal of Ecology, 1955, 427–448.
- [14] WANG L, OU H, ZHOU C P, et al. Soil organic matter dynamics along a vertical vegetation gradient in the Gongga Mountain on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, **47**(4): 411–420.
- [15] 吴艳宏, 周俊, 祁海健, 等. 贡嘎山海螺沟典型植被带总磷分布特征 [J]. 地球科学与环境学报. 2012, **34**(3): 70–74 [WU Y., ZHOU J., BING, H., et al. Characteristic of total phosphorus distribution in typical vegetation zones along Hailuoguo of Gongga mountain. Journal of Earth Sciences and Environmen. 2012, **34**(3): 70–74]
- [16] 程根伟, 罗辑. 贡嘎山亚高山林地碳的积累与耗散特征 [J]. 地理学报, 2003, **58**(2): 179–185 [CHENG Genwei, LUO Ji. The carbon accumulation and dissipation features of sub-alpine woodland in Mt. Gongga [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, **58**(2): 179–185]
- [17] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算 [J]. 地理研究, 1999, **18**(4): 349–356 [WANG Shaoqiang, ZHOU Chenghu. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China [J]. Geographical Research, 1999, **18**(4): 349–356]
- [18] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R E A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, **263**(5144): 185–189.
- [19] YAN J, ZHANG D, ZHOU G, LIU J. Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(5): 991–999.
- [20] WANG B, JIANG Y, WEI X, et al. Effects of forest type, stand age, and altitude on soil respiration in subtropical forests of China [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2011, **26**(1): 40–47.
- [21] YAN J, WANG Y, ZHOU G, et al. Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages in South China [J]. Global Change Biology, 2006, **12**(5): 810–821.

- [22] WANG X, ZHU B, LI C, et al. Dissecting soil CO₂ fluxes from a subtropical forest in China by integrating field measurements with a modeling approach[J]. *Geoderma*, 2011, **161**(1): 88–94.
- [23] WIEGLEB G, FELINKS B. Primary succession in post-mining landscapes of Lower Lusatia—chance or necessity[J]. *Ecological Engineering*, 2001, **17**(2): 199–217.
- [24] 程鹏飞, 王金亮, 王雪梅, 等. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展[J]. 林业调查规划, 2009, **34**(6): 39–45 [CHEN Pengfei, WANG Jinliang, WANG Xuemei, et al. Research progress in estimating carbon storage of forest ecosystem[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2009, **34**(6): 39–45]
- [25] 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. [ZHOU Yurong, YU zhenliang, ZHAO shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(5): 518–522]
- [26] 霍常富, 程根伟, 鲁旭阳, 等. 气候变化对贡嘎山森林原生演替影响的模拟研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, **32**(1): 1–6 [HUO Changfu, CHEN Genwei, LU Xuyang, et al. Simulation of climate change impacts on forest primary succession in Gongga Mountain, southwestern China. [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, **32**(1): 1–6]
- [27] HUANG Y H, LI Y L, XIAO Y, et al. Controls of litter quality on the carbon sink in soils through partitioning the products of decomposing litter in a forest succession series in South China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, **261**(7): 1170–1177.
- [28] TRUMBORE S E. Comparison of carbon dynamics in tropical and temperate soils using radiocarbon measurements [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(2): 275–290.
- [29] SAXE H, ELLSWORTH D S, HEATH J. Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere[J]. *New Phytologist*, 1998, **139**(3): 395–436.

Carbon Dynamics in Different Primary Succession Stages On Hailuoguo Glacier Forehead in Mount Gongga, China

LUO Ji¹, LI Wei^{1*}, SHE Jia², HE Yongmei^{1,3}, GAO Jianing^{1,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610031, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Seven sampling sites in vegetation primary succession of Hailuoguo glacier recession site, Mount Gongga, were set for observation to analyze organic carbon content in vegetation, coarse woody debris and soil. Continuous observation and tests in this seven sites were also carried out. Result showed that the organic carbon storages in seven sites of the primary forest succession were: 889.3, 8930.3, 13 902.5, 17021.5, 19 699.9, 26 121.9, 34 587.4 g C · m⁻², and the ecosystem components ranged as vegetation > soil > coarse woody debris as comparing with the organic carbon storage. The carbon flux of soil respiration for the seven sites were: 326.7, 265.7, 260.3, 382.5, 555.6, 774.9, 1030.5 g C · m⁻² · a⁻¹ separately. In case of future climate change, soil respiration in different stage of succession will increase with temperature growth. The seasonal pattern of soil respiration in early stage of succession changes significantly and it would be more sensitive to climate change, while the variation tends to be more moderate in later succession. Total organic carbon storage of ecosystem showed a trend of increasing in succession, and the efficiency of carbon sink in later succession were stronger.

Keywords: Hailuoguo; glacier forehead; primary succession; organic carbon storage