

Variation Characteristic and Influencing Factors of Forest Soil Carbon, Nitrogen and Sulfur Contents in Mt. Lushan, East China

Hui Zhou¹, Li Wu^{1,2*}, Jian Yu¹, Shuguang Lu¹, Xiaoling Sun¹, Huiling Fang¹, Chen Xu¹, Shuai Liu¹, Xiaomeng Zhu¹

¹Provincial Key Laboratory of Earth Surface Process and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin, School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu Anhui

²State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu

Email: *jedi-wuli@163.com

Received: July 7th, 2019; accepted: July 22nd, 2019; published: July 29th, 2019

Abstract

In order to explore the law of the migration and transformation of N, C, S elements in the forest soil in Mt. Lushan, on the basis of field observation, selecting six sampling sites with less disturbed by human activities to collect soil samples and the element content was determined and analyzed in the laboratory. The results showed that: 1) The values of TN, TC and TS in Mt. Lushan forest soil were 0.03% - 0.48%, 0.18% - 7.00%, 0.02% - 0.13%. The variation of TN and TC values was large, while the variation of TS was small. 2) Except for the RZF sampling site, TN and TC values of different layers in soil profile decreased significantly with the increase of depth; the stratification of RZF soil profile was not obvious, so the TN and TC values of each layer had no significant difference. 3) The soil element of LL sampling site was prone to leaching due to the large topographic slope, so the element content did not present the same changing characteristics as the other 5 sampling sites. The TN and TC values of these 5 sampling sites increased with the elevation. 4) The C/N value of Mt. Lushan forest soil was far less than the appropriate value 25 and lower than the average value of the national ecosystem. Its change trend was consistent with TN and TC. 5) C/S value was less than 200, and organic sulfur mineralization was strong. It was found that the migration and transformation of N, C and S elements in Mt. Lushan forest soil ecosystem were mainly affected by the temperature, topography, amount of forest litter and vegetation type.

Keywords

Mt. Lushan, Forest Soil, Carbon-Nitrogen-Sulfur, Organic Matter, Environmental Factor

庐山森林土壤碳氮硫含量变化特征及影响因素

周 慧¹, 吴 立^{1,2*}, 余 健¹, 路曙光¹, 孙小玲¹, 方会玲¹, 徐 琛¹, 刘 帅¹, 朱萧蒙¹

*通讯作者。

文章引用: 周慧, 吴立, 余健, 路曙光, 孙小玲, 方会玲, 徐琛, 刘帅, 朱萧蒙. 庐山森林土壤碳氮硫含量变化特征及影响因素[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(7): 660-669. DOI: 10.12677/ag.2019.97070

¹安徽师范大学地理与旅游学院, 江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 安徽 芜湖

²中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京

Email: jedi-wuli@163.com

收稿日期: 2019年7月7日; 录用日期: 2019年7月22日; 发布日期: 2019年7月29日

摘要

为探究庐山森林土壤中N、C、S元素迁移转化的规律, 本文在野外观察的基础上, 选取了6个受人类活动干扰较小的采样点进行样品采集, 并对其元素含量进行了测定与分析, 结果表明: 1) 庐山森林土壤中TN、TC、TS含量分别为0.03%~0.48%、0.18%~7.00%、0.02%~0.13%, TN、TC值变化幅度大, TS值变化幅度小; 2) 除RZF采样点外, 土壤剖面不同发生层TN、TC值随着深度的增加有显著的降低; RZF点分层不明显, 故各层TN、TC值差异不显著; 3) LL采样点因地形坡度大, 土壤元素易被淋失, 因此元素含量没有表现出与其他5处采样点相同的变化特征, 即TN、TC值随着海拔上升而增加; 4) 庐山森林土壤C/N值远小于适宜值25, 也低于全国生态系统平均值, 变化趋势与TN、TC一致; 5) 土壤C/S值均小于200, 有机硫矿化作用强。进一步讨论发现, 庐山森林土壤生态系统中N、C、S元素的迁移转化主要受温度、地形、地表枯枝落叶量及植被类型影响。

关键词

庐山, 森林土壤, 碳氮硫, 有机质, 环境因子

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为地球上最大的陆地碳库, 森林生态系统碳库的碳储量约占陆地总碳库的46% [1], 而森林土壤碳库又是森林生态系统碳库的主体, 因此其对全球碳循环和碳平衡的重要性不言而喻, 近年来对森林土壤碳含量研究也已经成为气候变化研究的主要关注点之一[2] [3] [4] [5]。研究显示, 土壤碳储量约为植被碳储量的2.5~3倍, 大气碳储量的2~3倍。森林土壤碳库由有机碳库与无机碳库两大部分组成, 有机碳库是指存在于土壤中的各种含碳有机物质, 其在好氧条件下可以通过微生物矿化分解, 最终以CO₂形式进入大气; 无机碳库即全球干旱半干旱地区土壤中的碳酸盐类, 包括原生性碳酸盐和次生性碳酸盐[6]。森林土壤无机碳储量相对较少, 并且变化幅度不大, 有机碳储量则十分庞大, 约占全球土壤有机碳储量的39%, 森林生态系统有机碳库的2/3 [7]。同样是以CO₂形式向大气中排放碳, 但因其巨大的碳储量, 土壤每年排放的碳通量约为化石燃烧排放量的12~16倍[8]。除此之外, 氮和硫元素也是土壤元素的主要组成。氮元素是土壤有机质的重要组成部分, 因此土壤氮含量高低是评价土壤质量的基本标准之一; 同时土壤氮含量变化还会改变微生物呼吸作用, 进而影响土壤CO₂排放[9]。硫的营养功能和循环机制与氮相似, 也是植物生长发育所必需的矿质营养元素, 植物所需的硫主要来源于根系对土壤中无机硫的吸收[10] [11]; 硫化物以多样的形态在陆地生态系统中发挥着重要的生态功能, 是参与生物地球化学循环的主要元素[12]。

土壤圈是地球表层与大气圈、生物圈、水圈、岩石圈相交的界面, 并进行着物质循环和能量转换,

常因成土环境的变化导致土壤性质的改变,进而影响土体内部物质的淋溶与淀积,导致土壤在发生发展的过程中产生质和量的变化[13]。土壤圈的元素转换会影响大气中温室气体成分的动态平衡,进而导致全球气候变化;不同的土壤类型,其元素迁移转化过程也不同。近些年来,通过对美国北部大平原、我国松嫩平原等地土壤中碳氮硫元素迁移转化过程的研究,学者们发现土壤中碳氮硫元素变化主要受到降水量、年均温、有机质含量、植被类型及植物根系发展程度等因素影响[14][15][16][17][18]。庐山因其特殊的地理位置和条件,形成了一套典型的山地森林土壤垂直带谱;不同森林土壤类型以及周围环境因子的变化,会直接或间接影响土壤中碳氮硫元素的累积与消耗,使得对土壤元素组成特征的研究变得困难。

本文依据庐山山地森林土壤垂直带谱的演变规律,选择具有代表性的采样点,试图找出森林土壤元素含量变化与森林土壤类型及其周围环境因子之间的相关性,以期探讨出庐山山地森林土壤生态系统演变对气候变化的影响。

2. 研究区概况

庐山位于江西省九江市庐山市境内,西北濒临长江,东南濒临鄱阳湖,范围介于 $115^{\circ}52'E\sim 116^{\circ}8'E$, $29^{\circ}26'N\sim 29^{\circ}41'N$ 之间。山体南北长约 29 km,东西宽约 15 km,海拔 25~1474 m,主峰汉阳峰为最高峰。气候属典型的亚热带季风气候,全年温和湿润,年均气温为 $11.4^{\circ}C$,年均降水量为 1917 mm。另外,作为典型的地垒式断块山体,山地小气候特征显著,年均相对湿度 78%,年均雾日 191 天。

此外,在不同的海拔高度下,庐山山体表面水热组合状况略有不同,进而影响气候、生物、土壤等环境条件,导致自然带呈现出垂直方向上的明显变化。庐山土壤类型的分布状况为:400 m 以下山麓及山麓以外的丘陵和沉积阶地为红壤和黄壤分布区域;400 m~1200 m 山坡地带,为黄壤和棕壤的分布区域;1000 m 以上的山地,为山地棕壤和亚高山草甸土分布区域。植被由山麓到山顶垂直分布主要呈现出常绿阔叶林 → 常绿、落叶阔叶混交林 → 落叶阔叶林的变化规律[19]。

3. 材料与方法

为详细了解庐山不同海拔高度土壤碳氮硫元素含量的变化特征,通过野外考察,根据“典型性、代表性、一致性”的采样原则,选取了 6 个受人类活动影响小,且垂直分层明显的采样点。采样点地理位置与详细信息如图 1、表 1 所示。采样时将地面的落叶与杂物清理干净,用土铲挖出垂直的土壤剖面,

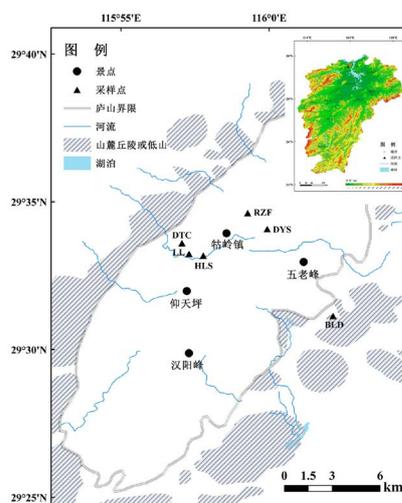


Figure 1. Geographic location of the sampling sites in Mt. Lushan
图 1. 庐山各采样点地理位置示意图

根据土壤的颜色、干湿湿度、松紧度、新生体等指标将土层分为腐殖质层、淋溶层和淀积层三个发生层。在每一土层取土样约 30 g 装入样品袋中，写上编号、采集地点、采集时间、地表植被类型、土壤名称、采集深度、土壤性质的描述等信息。样品采集完成后将土坑填平。

Table 1. The detailed information of geographic location and the soil profile of the sampling sites in Mt. Lushan
表 1. 庐山各采样点地理位置及土壤剖面信息

采样点	经纬度	海拔 /m	剖面深度 /cm	采样点代号	采样点深度 /cm	分层界限 /cm	地表植被类型	分层概况
白鹿洞书院	116°22'11"E, 29°31'9"N	190	160	BLD-6	6	1~9	常绿阔叶林	腐殖质层 A: 浅黄色、紧实、较干
				BLD-23	23	9~35		淋溶层 E: 黄色、紧实、干
				BLD-160	160	35~160		淀积层 B: 红棕色、紧实、干
黄龙寺	115°57'47"E, 29°33'11"N	900	55	HLS-10	10	2~16	常绿落叶阔叶混交林	腐殖质层 A: 黑褐色、疏松、稍润
				HLS-25	25	16~29		淋溶层 E: 褐色、疏松、稍润
				HLS-40	40	29~55		淀积层 B: 黄色、紧实、润
大天池	115°57'4"E, 29°33'37"N	950	48	DTC-6	6	2~11	黄山松针叶林	腐殖质层 A: 暗棕色、疏松、稍润
				DTC-17	17	11~22		淋溶层 E: 棕色、疏松、稍润
				DTC-35	35	22~48		淀积层 B: 黄棕色、紧实、润
芦林大坝	115°57'19"E, 29°33'16"N	980	66	LL-4	4	1~6	柳杉针叶林	腐殖质层 A: 黑灰色、松散、稍润
				LL-20	20	6~33		淋溶层 E: 灰黄色、疏松、润
				LL-47	47	33~66		淀积层 B: 棕黄色、紧实、润
日照峰	115°59'15"E, 29°34'37"N	1240	90	RZF-6	6	1~9	芒草	腐殖质层 A: 深褐色、松散、稍润
				RZF-30	30	9~45		淋溶层 E: 棕色、疏松、稍润
				RZF-60	60	45~90		淀积层 B: 棕黄色、紧实、润
大月山	115°59'56"E, 29°34'5"N	1300	113	DYS-30	30	2~40	落叶阔叶林, 黄山松针叶林	腐殖质层 A: 暗棕色、疏松、稍润
				DYS-45	45	40~55		淋溶层 E: 灰黄棕色、疏松、润
				DYS-80	80	55~113		淀积层 B: 黄棕色、紧实、润

样品带回实验室后，剔除土壤中的杂质(石子、枯枝落叶等)，1) 将样品置于室内自然晾干，研磨过 10 目筛；2) 取一定量的样品，加入 5% 的稀盐酸多次搅拌，不断加入稀盐酸至反应完全，浸泡二十四小时；3) 用中性去离子水水洗至中性(pH = 7)，烘干后将样品用玛瑙研钵研磨至粉末状，过 200 目筛；4) 根据样品中总氮、总碳和总磷的含量(预先根据不同发生层土壤样品性状测定了若干不同的控制样)称取一定量(约 200 mg)的被测样品在锡纸紧密包裹下送入德国 Elementar 公司生产的 Vario EL cube 元素分析仪直接测定出 TN、TC、TS 和 C/N、C/S 值。使用 Microsoft Office Excel 2007 软件对数据进行处理分析，OriginPro 8.0 和 ArcGIS 10.1 绘制图表(表 2)。

Table 2. The contents of N, C, S and C/N, C/S values of the sampling sites' soils in Mt. Lushan
表 2. 庐山各采样点土壤 N、C、S 含量以及 C/N、C/S 值

分层	采样点	元素含量				
		N (%)	C (%)	S (%)	C/N	C/S
腐殖质层	BLD-6	0.13	1.11	0.02	8.33	55.50
	HLS-10	0.23	3.12	0.04	13.55	78.00
	DTC-6	0.24	3.49	0.04	14.56	87.25
	LL-4	0.17	1.65	0.04	9.92	41.25
	RZF-6	0.26	2.92	0.06	11.38	48.67
	DYS-30	0.48	7.00	0.07	14.68	100.00
	BLD-23	0.08	0.54	0.04	6.79	13.50
淋溶层	HLS-25	0.15	1.46	0.02	9.76	73.00
	DTC-17	0.15	1.71	0.04	11.68	42.75
	LL-20	0.08	0.74	0.03	8.84	21.76
	RZF-30	0.21	2.10	0.13	10.18	16.15
	DYS-45	0.32	4.33	0.07	13.38	61.86
	BLD-150	0.06	0.18	0.02	3.12	9.00
	HLS-40	0.05	0.39	0.12	7.80	3.25
淀积层	DTC-35	0.05	0.37	0.03	7.33	12.33
	LL-47	0.03	0.13	0.02	4.88	6.50
	RZF-60	0.16	1.67	0.06	10.68	27.83
	DYS-80	0.20	1.98	0.06	10.05	33.00

4. 结果分析与讨论

4.1. TN、TC、TS 含量变化特征及其影响因素

土壤剖面是一个不断演化和发育的自然实体,其特征是在一定地形和时间条件下,由气候和生物共同对母质作用的结果。同一土壤剖面发生层是由性质和形态相同的土层重叠在一起构成的,在其土壤成土过程中物质淋溶、淀积、迁移和转化基本类似[6]。而不同的发生层由于距地表距离等条件差异,土壤理化性质具有显著的区别。如图 2 所示,庐山土壤 TN 含量变化范围为 0.03%~0.48%,TC 含量变化范围为 0.13%~7.00%,TS 含量变化范围为 0.02%~0.13%;TC 含量变化幅度远高于 TN 与 TS 的变化幅度,可知 TC 含量变化受周围环境因素影响较大。土壤表层腐殖质层的最高 TN 含量为 0.48%,最低值为 0.13%;最高 TC 含量为 7.00%,最低值为 1.11%;最高 TS 含量为 0.07%,最低值为 0.02%。中间层淋溶层,最高 TN、TC、TS 含量分别为 0.32%、4.33%与 0.13%,最低值分别为 0.08%、0.54%、0.02%。底部淀积层最高 TN 含量为 0.20%,TC 为 1.98%,TS 含量为 0.12%,最低 TN、TC、TS 含量依次为 0.03%、0.13%和 0.02%。采样点土壤剖面各层 TC 与 TN 含量的最大值与最小值皆随深度增加而减小,且最大值都出现在海拔最高的 DYS 采样点,最低值一般都是海拔最低的 BLD 采样点。

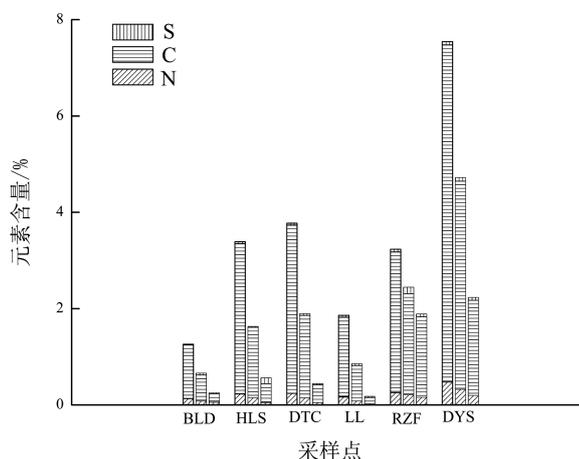


Figure 2. The contents of N, C, S in soil of different sampling sites in Mt. Lushan (Each sampling site's columns represent humus layer, leaching layer and deposition layer successively from left to right)

图 2. 庐山各采样点土壤 N、C、S 元素含量(每一采样点条柱从左向右依次代表腐殖质层、淋溶层、淀积层)

从图 3 中可以看出, 采样点土壤各剖面发生层 TN、TC 含量大致是随着海拔的上升而增加, 该结果与杨益等[20]、向成华等[21]、周志文等[22]的研究结果一致。土壤 TC 主要来源于土壤有机碳(包括植物、动物及微生物的遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质)与无机碳(包括土壤中 CO_2 、碳酸盐等含碳的无机物)。土壤有机碳含量的变化由进入土壤的植物残体量及其在土壤微生物作用下分解损失二者之间平衡所决定[23], 而这两者之间平衡与否又受到气候、植被、土壤理化特性以及人类活动等诸多因素的影响[24]。无机碳方面, 在排水条件良好的情况下, 土壤无机碳绝大部分来源于固相的碳酸盐; 而土壤中的碳酸盐主要包括岩生性碳酸盐和发生性碳酸盐, 前者指来源于成土母质或母岩, 未经风化成土作用而保存下来的碳酸盐, 这要求成土母质或母岩为主要分布在我国北部以及西北部干旱地区的石灰性母质, 后者指在风化成土过程中形成的碳酸盐, 多发生在相对干旱的草原或者草灌植被土壤, 且年均降水量小于 800 mm。同时, 样品中若含有大量碳酸盐, 则往样品中滴加稀盐酸会产生大量气泡; 但在实际操作过程中, 并未出现这一现象, 说明庐山土壤中的无机碳含量较少, 即有机碳中的碳元素是 TC 的主要来源, TC 值变化主要取决于有机碳含量的改变, 后文论述中也将 TC 值近似作有机碳含量处理[25] [26]。本文所选取的 6 个采样点受人类活动干扰较少, 土壤表层积累有大量的植物枯枝落叶, 这有利于表层土壤有机碳的累积。尽管随土层深度的增加分解者的活动逐渐减弱, 使得植物枯枝落叶在土壤中的位置越深, 其分解也越慢, 同时土层深处的养分含量降低也限制了有机碳的分解, 但这些因素的影响远不及土壤表层植物枯枝落叶有机碳大量输入对土壤 TC 含量的影响。在有机碳含量变化的影响下, 各采样点土壤剖面发生层 TC 含量随着深度的增加而趋于减少。气温对土壤有机碳含量的影响主要体现在两个方面: 一是影响植物的生长, 改变植物残体向土壤的归还量; 二是影响有机碳分解的速率, 改变土壤中有机碳的释放量[27] [28]。海拔升高, 气温下降, 会制约土壤中微生物对有机碳的分解与转化, 导致有机碳不断积累; 同时, 庐山植被伴随着海拔的升高, 由常绿林逐渐过渡到落叶林, 落叶林的地表枯枝落叶累积量较常绿林更大, 所以各采样点土壤剖面不同发生层 TC 值随着海拔的升高而逐渐增加[24]。

土壤氮素的输入量主要取决于植物残体的归还量及生物固氮[29]。生物固氮即土壤微生物分解有机质形成腐殖质, 使得土壤有机质含量增加的过程中将大气中的氮元素固定到土壤中, 导致土壤中氮元素含量增加, 因此土壤 TN 含量主要由土壤中的有机质含量与土壤微生物活动所决定。采样点上部腐殖质层 TN 值高主要是因为土壤表层覆盖有大量枯枝落叶, 微生物分解有机质累积大量腐殖质的同时使氮元素含量增加; 土壤深度愈深, 有机物愈少, 腐殖质含量减少, TN 含量下降[30]。海拔低, 温度偏高, 土壤微

生物活性大, 土壤有机氮更易矿化被植物体吸收, 含量下降; 海拔升高, 温度降低, 微生物活动减弱, 有机物的分解速度变缓, 土壤有机氮的矿化速率下降, 使土壤中氮积累量变高; 另外, 与土壤 TC 含量升高的原因相同, 植被由常绿林变为落叶林, 也是 TN 含量随海拔增加而上升的一个因素。

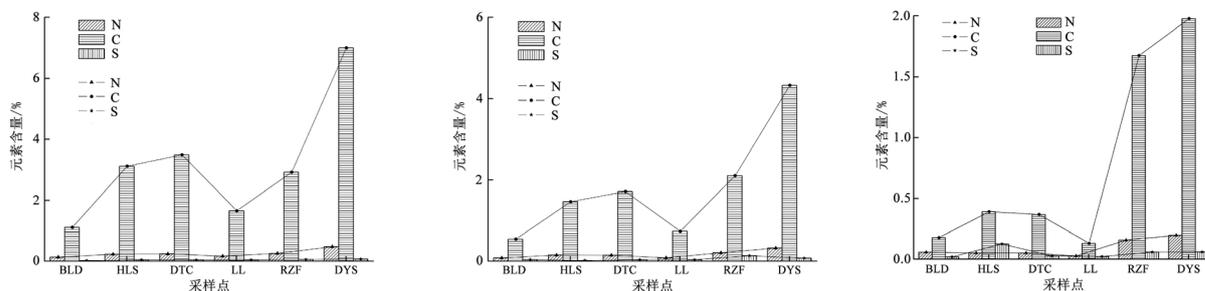


Figure 3. The contents of N, C, S in different layers of soil at different sampling sites in Mt. Lushan (The humus layer, leaching layer and deposition layer are represented from left to right)

图 3. 庐山各采样点土壤不同发生层 N、C、S 元素含量(从左向右依次代表腐殖质层、淋溶层、淀积层)

土壤中的 TS 含量与土壤有机质含量密切相关, 并且土壤中大部分的硫以有机形态存在, 无机硫则因为易于被植物体吸收而较难在土壤中积累, 因此土壤 TS 含量及其变化幅度主要取决于有机硫含量的波动 [31] [32] [33]。各采样点土壤 TS 含量约为 500 mg/kg, 与李男等 [34] 的研究结果接近; 多数采样点不同剖面土壤 TS 含量表层低于深层, 造成这种现象的原因主要有两个, 一是因为土壤深度越深, 植物根系越少, 对硫元素的吸收越少, 二是土温会随着深度的增加而减少, 温度降低, 土壤有机质矿化速率减慢, 使得土壤中有机硫含量相对增加, TS 含量随之增加 [32] [33] [34]。而 TS 含量变化幅度呈现随土壤深度增加而变小的变化规律。一般来说, 土壤深度增加, 土壤中有机质含量受外界干扰的程度降低, 总体变化幅度减小, 间接导致土壤中有机硫含量波动变弱, TS 含量变化也随之减弱。

需要说明的是, 6 个采样点各发生层 TN、TC、TS 的最低含量值基本皆出现在非海拔最低点 LL 采样点处, 主要是因为该采样点坡度较大, 且年均降水量大, 土壤 N、C、S 元素易被降水淋失, 难以积累。RZF 采样点处剖面分层不明显, 土壤质地均一且较为松散, 尽管不同发生层 TN、TC、TS 含量也符合随土壤深度的增加而变小的规律, 但变化幅度小于其他 5 处采样点。DTC 与 DYS 采样点腐殖质层 TN、TC 值高, 其中 DYS 采样点比 RZF 采样点海拔仅高 40 m, 但其腐殖质层 TC 值约为 RZF 点的 2.4 倍, DTC 腐殖质层 TC 值也要大于海拔更高的 RZF 点; 这是因为土壤 TN、TC 值除受海拔影响外, 还可能与这两处的植被类型有关。这两处的植被类型为黄山松, 属于针叶林; 而宋彦彦等 [35] 认为, 针叶林凋落的叶片密集覆盖于土壤表面, 容易形成空气不流通的环境, 更有利于有机碳的积累, 因此导致 DTC 和 DYS 采样点腐殖质层 TC 和 TN 值相对较高。

4.2. C/N、C/S 值变化特征

作为一个多相、多界面的复杂系统, 土壤碳氮的变化涉及到植被类型、气候变化、土壤理化性状、凋落物分解和土壤呼吸等众多相互联系和相互影响的生物化学过程。因此, 在生态系统的物质循环研究中, 经常将土壤碳氮作为重要的参考指标。相关研究认为, 土壤有机碳与全氮之间具有较为显著的正相关性 [36]。土壤 C/N 值一般可以衡量土壤氮素矿化的能力, 低 C/N 值指示氮的高矿化率。在土壤微生物生长和繁殖过程中, 碳元素提供其所需要的能量, 氮元素则是微生物构成身体的一部分。研究显示, 土壤微生物碳分解过程中, 碳氮比值约在 25~30 之间, 因此土壤 C/N 值在 25~30 之间比较适宜 [37], 既不会产生碳元素的过量, 又不会导致氮元素的缺乏。总体看来, 各采样点土壤 C/N 值均不超过 15, 远小于适宜值, 也普遍低于全国生态系统的平均值 13, 表明庐山土壤氮素过剩, 超出微生物生长所需的氮元素

就会释放到土壤和枯枝落叶层中,使得庐山土壤有机质腐殖质化程度较高,有利于土壤微生物的分解与有机氮的矿化[38]。从图4中可以看出,各采样点土壤不同发生层的C/N值大体上都自腐殖质层到淋溶层再到淀积层依次减小,且海拔增高,C/N值会有所增大。造成这种现象的原因,主要是温度的变化导致土壤微生物活性的改变,以及土壤表层枯枝落叶层对土壤中有机碳含量的影响。DTC与DYS采样点C/N值高,可能是因为这两处采样点有机碳含量高,因此C/N值偏高。

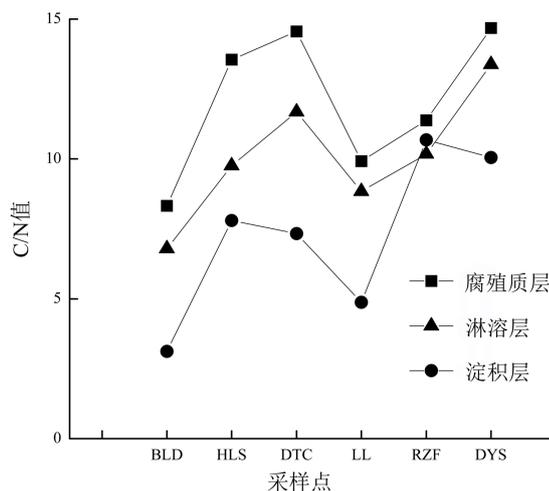


Figure 4. The C/N values of different soil layers at different sampling sites in Mt. Lushan
图4. 庐山各采样点土壤不同发生层C/N值

在森林土壤生态系统硫的生物化学循环过程中,C/S值也有着重要的指示作用。研究表明,土壤C/S值决定了土壤硫转化的方向,当C/S值大于400时,土壤硫固定作用增强;当C/S值小于200时,土壤中有机硫进行矿化作用;当C/S值介于200到400之间时,土壤中的硫酸根离子既不从有机硫中释放,也不用来合成有机硫[39]。图5显示,庐山各采样点森林土壤的C/S值均小于200,说明庐山森林土壤现阶段有机硫矿化作用较强;且土壤表层的C/S值一般都高于底层,高海拔地区C/S值高于低海拔地区,说明底层土壤与高海拔地区土壤中有机硫矿化度分别大于表层土壤、低海拔地区土壤。同时,底层土壤C/S值变化幅度小于表层,推断可能是由于土壤中硫的生物化学循环过程受外界环境因子的影响较少。

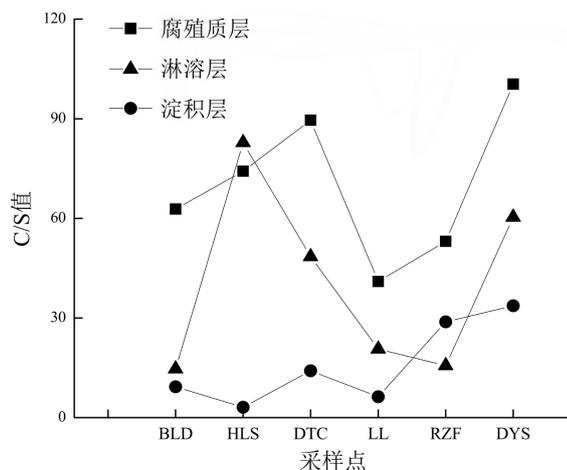


Figure 5. The C/S values of different soil layers at different sampling sites in Mt. Lushan
图5. 庐山各采样点土壤不同发生层C/S值

5. 结论

1) 随着剖面深度的增加, 庐山森林土壤中 TN、TC 含量不断下降; 采样点海拔越高, 土壤中 TN、TC 含量则越高。

2) 庐山森林土壤中 TN、TC 含量受外界环境因子的影响显著, 影响因素包括土壤温度、地表枯枝落叶量、地形以及地表植被类型等。

3) 庐山森林土壤 C/N 值普遍低于全国生态系统的平均值, 土壤氮的矿化率高; C/N 值的变化趋势以及导致其变化的原因与 TN、TC 的一致; C/S 值均低于 200, 土壤有机硫矿化作用较强, 且底层土壤与高海拔地区土壤中有机硫的矿化度分别高于表层土壤与低海拔地区土壤; 土壤 C/N、C/S 值的变化主要取决于土壤中有机碳含量的变化。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(41771221); 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1851); 安徽省省级大学生创新训练计划项目(S201910370018)。

参考文献

- [1] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分布土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1569-1577.
- [2] 陈富荣, 梁红霞, 邢润华, 等. 安徽省土壤固碳潜力及有机碳汇(源)研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 843-851.
- [3] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 211-217.
- [4] 白小芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松人工林土壤氮碳磷生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 68-75.
- [5] 沙聪, 王木兰, 姜玥璐, 等. 红树林土壤 pH 和其他土壤理化性质之间的相互作用[J]. 科学通报, 2018, 63(2): 2745-2756.
- [6] 孟延, 周建斌, 郝平琦, 等. 土壤无机碳研究进展及意义[J]. 北方农业学报, 2017, 45(3): 54-57.
- [7] Lal, R. (2005) Forest Soils and Carbon Sequestration. *Forest Ecology and Management*, **220**, 242-258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- [8] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 518-524.
- [9] 彭少麟, 李跃林, 任海, 等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 705-713.
- [10] Tisdale, S.L., Nelson, W.L. and Beaton, J.D. (1985) *Soil Fertility and Fertilizers*. Collier Macmillan Publishers, London.
- [11] 李新华, 刘景双, 孙志高, 等. 三江平原小叶章湿地生态系统硫的生物地球化学循环[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2199-2207.
- [12] Solomon, D., Lehmann, J., Tekalign, M., et al. (2001) Sulfur Fractions in Particle-Size Separates of the Sub-Humid Ethiopian Highlands as Influenced by Land Use Changes. *Geoderma*, **102**, 41-59. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00103-8)
- [13] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 等. 自然地理学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [14] Wang, J.K., Solomon, D., Lehman, J., et al. (2006) Soil Organic Sulfur Forms and Dynamics in the Great Plains of North America as Influenced by Long-Term Cultivation and Climate. *Geoderma*, **133**, 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.003>
- [15] Hartley, I.P., Heinemeyer, A., Evans, S.P., et al. (2007) The Effect of Soil Warming on Bulk Soil vs. Rhizosphere Respiration. *Global Change Biology*, **13**, 2654-2667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01454.x>
- [16] Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., et al. (2000) Separating Root and Soil Microbial Contributions to Soil Respiration: A Review of Methods and Observations. *Biogeochemistry*, **48**, 115-146. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>

- [17] Schlesinger, W.H. and Andrews, J.A. (2000) The Potential Effects of Elevated CO₂ and Climate Change on Tropical Forest Soils and Biogeochemical Cycling. *Climatic Change*, **39**, 337-361.
- [18] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1407-1414.
- [19] 朱晓芳, 关雪晴, 付晶莹. 庐山土壤全氮含量及其影响因素初探[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(16): 6868-6869.
- [20] 杨益, 牛得草, 文海燕, 等. 贺兰山不同海拔土壤颗粒有机碳、氮特征[J]. 草业学报, 2012, 21(3): 54-60.
- [21] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 等. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1025-1034.
- [22] 周志文, 潘剑君, 居为民, 等. 神农架不同坡位 3 种林型土壤碳氮比分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 211-217.
- [23] Post, W.M., King, A.M. and Wullschlegel, S.D. (1996) Soil Organic Matter Models and Global Estimates of Soil Organic Carbon. In: Powlson, D.S., et al., Eds., *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Springer, Berlin, 201-224. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_14
- [24] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [25] 王海荣, 杨忠芳. 土壤无机碳研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(35): 21735-21739.
- [26] 杨黎芳, 李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 986-990.
- [27] 刘颖, 韩士杰. 长白山四种森林土壤呼吸的影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1061-1065.
- [28] Jia, B., Zhou, G., Wang, Y., et al. (2006) Effects of Temperature and Soil Water-Content on Soil Respiration of Grazed and Ungrazed *Leymus chinensis* Steppes, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, **67**, 60-76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.002>
- [29] Liu, Q., Peng, S.L., Bi, H., et al. (2004) The Decomposition of Foliar Litter Intropical and Subtropical Forests. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis*, **43**, 86-89.
- [30] 王军静, 白军红, 赵庆庆, 等. 哈拉海湿地芦苇沼泽土壤碳、氮和磷含量的剖面特征[J]. 湿地科学, 2014, 12(6): 690-696.
- [31] 刘潇潇, 王钧, 曾辉. 中国温带草地土壤硫的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7919-7928.
- [32] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 68-76.
- [33] 张贤应, 於忠祥, 葛承文, 等. 庐山土壤硫组分分布特征研究[J]. 安徽农学通报, 1999, 5(1): 24-27.
- [34] 李男, 肖化云, 陈永忠, 等. 江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 3782-3787.
- [35] 宋彦彦, 史宝库, 张言, 等. 长白山 8 种林型土壤有机碳和全氮的质量分数及垂直分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(12): 94-97.
- [36] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5207-5216.
- [37] 朱红霞, 王艳玲, 张耀鸿, 等. 紫金山不同海拔高度土壤的碳氮分布特征[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2012, 4(4): 326-329.
- [38] Tian, H., Chen, G., Zhang, C., et al. (2010) Pattern and Variation of C: N: P Ratios in China's Soils: A Synthesis of Observational Data. *Biogeochemistry*, **98**, 139-151. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9382-0>
- [39] Solomon, D., Lehmann, J., Kinyangi, J., et al. (2009) Anthropogenic and Climate Influences on Biogeochemical Dynamics and Molecular-Level Speciation of Soil Sulfur. *Ecological Applications*, **19**, 989-1002. <https://doi.org/10.1890/08-0095.1>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org