

何晓丽,吴艳宏,周俊,等.淋溶过程对亚高山针叶林土壤碳、氮海拔分布特征的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(1):187-194.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlnxb.2021.01.023

# 淋溶过程对亚高山针叶林土壤碳、氮海拔分布特征的影响

何晓丽<sup>1</sup>,吴艳宏<sup>2</sup>,周俊<sup>2</sup>,马婷婷<sup>1</sup>

1.湖北文理学院资源环境与旅游学院,襄阳 441053; 2.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041

**摘要** 为揭示淋溶过程在山地养分循环中的重要作用,研究了贡嘎山东坡海拔2 600~3 200 m针叶林土壤碳(C)、氮(N)的海拔分布特征,分析了不同海拔4个样点的针叶林土壤C、N含量及碳氮比(C/N),并结合其他土壤物理、化学和生物指标探讨了淋溶过程对土壤C、N海拔分布特征的影响。结果显示:分解强烈的凋落物层(O<sub>H</sub>层)的C、N含量和碳氮比(C/N)随海拔升高有降低趋势。由于凋落物碳(C<sub>lit</sub>)含量分别与O<sub>H</sub>层C、N含量显著正相关( $P<0.05$ ),因此,O<sub>H</sub>层C、N海拔分布特征主要由C<sub>lit</sub>输入量控制。与O<sub>H</sub>层相比,矿质土层(A、B和C层)中C、N含量及C/N并未发现明显的梯度变化趋势。A层C、N含量在2 781 m样点较低,而B和C层C、N含量均在2 781 m样点最高。天然降雨中C、N含量明显低于壤中流中C、N含量,展现了淋溶作用对C、N空间分布的影响。上述结果表明,淋溶过程对西南亚高山针叶林土壤C、N空间分布格局具有不可忽略的影响。

**关键词** 碳、氮海拔分布特征;淋溶过程;针叶林土壤;亚高山;山地养分循环;C、N生物地球化学循环

**中图分类号** P 593; S 153.6   **文献标识码** A   **文章编号** 1000-2421(2021)01-0187-08

土壤C、N含量分别取决于C、N输入量和输出量之差<sup>[1]</sup>。自然生态系统中土壤C输入主要受有机体残渣归还量的影响<sup>[2]</sup>,N输入主要受凋落物归还、生物固氮和大气沉降等过程控制<sup>[3]</sup>。两者的输出都依赖于生物过程(同化作用和呼吸作用等)、地球化学过程和物理过程(径流侵蚀等)的共同作用<sup>[4-5]</sup>。因此,在自然生态系统中土壤C、N海拔分布特征受气候、植被、微生物活动和径流等诸多因素影响<sup>[6-7]</sup>。王琳等<sup>[1]</sup>和王良健<sup>[8]</sup>都发现了土壤C、N含量随海拔升高而增大的趋势,认为气候和植被类型是影响贡嘎山东坡土壤C、N空间分布的主要因素。对贡嘎山东坡土壤C、N的其他相关研究<sup>[9]</sup>发现,当地气候、植被类型和土壤发育是该区与其他陆地生态系统C、N分布差异的主要原因。以上研究多着眼于生物化学过程对土壤C、N空间分布的影响,忽视了物理过程的重要作用。已有研究发现,山地棕壤和暗棕壤中发生了较明显的淋溶过程<sup>[10]</sup>,导致土壤溶质快速、大量迁移<sup>[11]</sup>。可见,目前有关土壤C、N随海拔梯度的变化模式和主要影响因素还存在

较多争论。

贡嘎山东坡亚高山海拔2 600~3 200 m的针叶林是开展土壤C、N垂直分异规律研究的“天然实验室”。研究区土壤母质和植被类型差异较小,温度和降水存在明显的梯度差异<sup>[12]</sup>。随海拔升高,温度降低,植物生物量和凋落物产量应逐渐降低<sup>[2]</sup>,则土壤C、N来源减少,C、N含量应随之减少。然而,土壤微生物活性随海拔升高而减弱<sup>[6-7]</sup>,则土壤C、N含量应逐渐增加。此外,本研究区是贡嘎山东坡降水量最大的区域<sup>[12]</sup>,较大的降水量和相对“年轻”的土壤,有利于淋溶过程的发生,会对土壤C、N的海拔分布规律产生影响。本研究通过对不同海拔4个样点的针叶林土壤C、N含量及C/N分析,阐明土壤C、N海拔分布特征,并结合其他土壤物理、化学和生物指标探讨淋溶过程对土壤C、N海拔分布特征的影响,旨在揭示淋溶过程在山地养分循环中的重要作用,并为阐明C、N生物地球化学循环的机制提供依据。

收稿日期:2020-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41630751; 41877011);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020016);湖北文理学院学科开放基金项目(XK2020063)

何晓丽,E-mail: xlhe@hnuas.edu.cn

通信作者:吴艳宏,E-mail: yhwu@imde.ac.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贡嘎山位于青藏高原东南缘,最高峰海拔 7 556 m。由于相对高度差达 6 km,各种环境要素随海拔发生急剧变化,形成完整的土壤和植被带谱。针叶林在贡嘎山地区分布范围最广,是最重要的森林分布区之一<sup>[13]</sup>。该区主要受东亚季风影响,年平均气温 4.2 ℃(海拔 3 000 m),1 月平均气温 -4.6 ℃,7 月平均气温 12.5 ℃,年均降雨量约为 1 947 mm,年平均相对湿度为 90% 左右,年平均蒸发量约为 327 mm<sup>[12]</sup>。土壤成土母质主要为花岗岩,由低海拔至高海拔发育了山地棕壤(2 600~2 800 m)和山地暗棕壤(2 800~3 200 m)<sup>[10]</sup>。

### 1.2 样品采集

在贡嘎山东坡海拔 2 628 m(S1)、2 781 m(S2)、3 044 m(S3)和 3 210 m(S4)的峨眉冷杉林冠下设置 4 个采样点。每个样点随机选取坡度小于 30° 的坡中位置挖掘 6 个土壤剖面,每个剖面间距大于 10 m。在每个剖面表层按照 10 cm × 10 cm 样方采集分解较少的枯枝落叶层(O<sub>L</sub> 层)样品。土壤剖面由上至下依次为分解强烈的凋落物层(O<sub>H</sub> 层)、淋溶层(A 层)、淀积层(B 层)和母质层(C 层)。按照土壤发生层由下至上依次采集 4 个土层样品。样品采集结束后,分别在 O<sub>H</sub>、A 和 B 层埋入温度记录仪(MAXIM DS 1923, USA),设定采样间隔为 1 h,连续监测各层温度状况。所有样品用聚乙烯袋封装,低温带回实验室。

### 1.3 样品分析

凋落物样品风干后研磨过孔径 0.075 mm 筛待测。土壤样品过孔径 2 mm 筛后分为两部分:一部分室内风干,另一部分保存于 4 ℃。土壤含水率用烘干法测定。土壤 pH 用电极法测定,水土比(mL/g)分别为 10 : 1(O<sub>H</sub> 层)和 2.5 : 1(A、B 和 C 层)。无定形铁(Fe<sub>ox</sub>)和无定形铝(Al<sub>ox</sub>)含量采用草酸-草酸铵法提取<sup>[14]</sup>,用 ICP-OES (PerkinElmer Optima 8300, USA) 测定,检测限均为 0.001 mg/L。C、N 含量用元素分析仪(Vario Isotope Cube, Germany)测定,其中 O<sub>L</sub> 层 C、N 含量表征凋落物碳(C<sub>lit</sub>)和凋落物氮(N<sub>lit</sub>)含量,检测限分别为 0.050% 和 0.015%。微生物生物量碳(MBC)和生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸法测定<sup>[15]</sup>。

### 1.4 数据统计

利用单因素方差分析(One-way ANOVA)在  $\alpha=0.05$  水平判识不同土层和不同海拔梯度土壤属性差异。若样本总体方差齐次,选择 Duncan's 检验;否则,选择 Tamhane 检验。利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)探讨土壤属性间的相关关系。上述分析和图通过 R 3.2.2 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质

除土壤温度随海拔升高呈完整的降低趋势外,土壤含水率、pH、Fe<sub>ox</sub> 含量和 Al<sub>ox</sub> 含量的梯度变化趋势均不明显,且在 S2 样点较特殊(图 1)。除 A 层外,其他各层土壤含水率均在 S2 样点最高,最高值为(338.1±29.5)%。除 C 层外,其他各层 S2 样点 pH 值显著低于其他样点( $P<0.05$ )。O<sub>H</sub> 和 A 层 Fe<sub>ox</sub> 含量均在 S2 样点最低,而 B 和 C 层 Fe<sub>ox</sub>、Al<sub>ox</sub> 含量在 S2 样点最高。

分解强烈的凋落物层(O<sub>H</sub> 层)与矿质土层(A、B 和 C 层)的土壤理化性质存在较大差异。O<sub>H</sub> 层温度和含水率均高于矿质土层,且同一采样点矿质土层温度和含水率均不存在显著性差异( $P>0.05$ )。4 个土层中 A 层 pH 均值最小,为 4.6±0.1。O<sub>H</sub> 层 Fe<sub>ox</sub> 和 Al<sub>ox</sub> 含量最低;B 层 Fe<sub>ox</sub> 和 Al<sub>ox</sub> 含量最高。

### 2.2 碳、氮含量及碳氮比

除 O<sub>L</sub> 层 N<sub>lit</sub> 在海拔梯度上不存在显著性差异外( $P>0.05$ ),凋落物层(O<sub>L</sub> 和 O<sub>H</sub> 层)的 C、N 含量及 C/N 随海拔升高呈降低趋势(图 2)。

与凋落物层 C、N 含量相比,矿质土层中 C、N 含量并未发现明显的梯度变化趋势,且矿质土层中 C、N 含量显著降低( $P<0.05$ )。与 O<sub>H</sub> 层相比,A 层 C、N 含量均在 S2 样点降低程度最大,分别降低了 87.2% 和 86.4%。B 层中 C、N 含量均在 S2 样点最高,分别为(44.7±6.2) g/kg 和(2.0±0.3) g/kg。C 层的 C、N 含量在 S2、S3 和 S4 样点均不存在显著性差异( $P>0.05$ )。

与凋落物层 C/N 相比,矿质土层 C/N 也未发现明显的梯度变化趋势。S2 样点的 C/N 显著高于其他样点( $P<0.05$ ),S1、S3 和 S4 样点的 C/N 不存在显著性差异( $P>0.05$ )。凋落物层 C/N 大于矿质土层,由 O<sub>L</sub> 层至 C 层的 C/N 均值依次为 29.1、19.4、16.4、18.3 和 16.4。

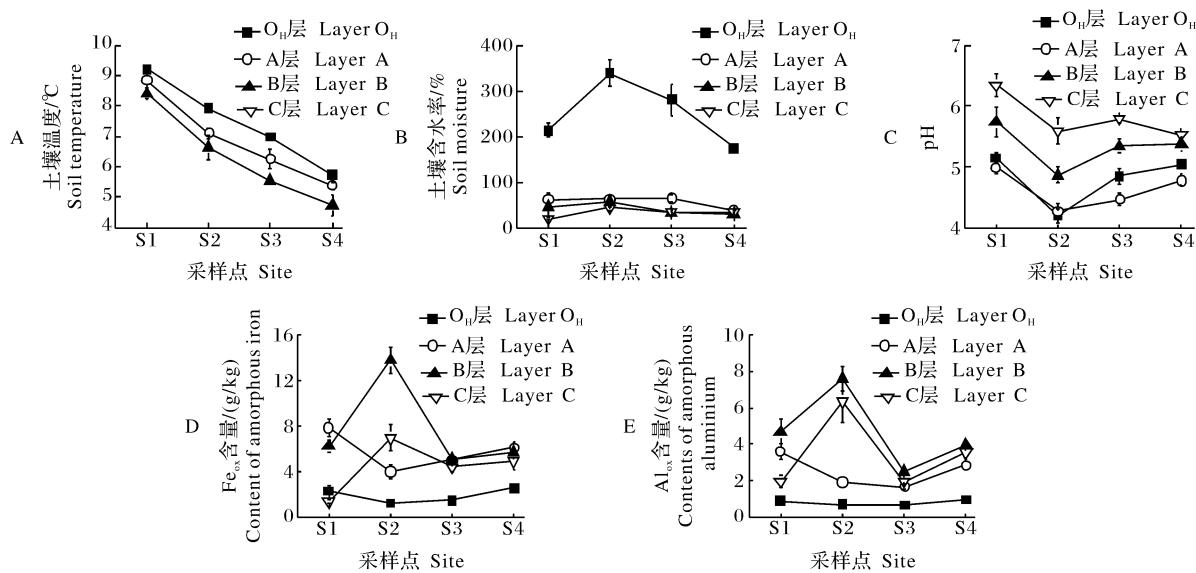
图 1 贡嘎山东坡针叶林土壤的土壤温度(A),含水率(B),pH(C),Fe<sub>ox</sub>含量(D)和Al<sub>ox</sub>含量(E)

Fig.1 Soil temperature(A),moisture(B),pH(C),contents of amorphous iron(D) and contents of amorphous aluminium(E) of sampling sites in the coniferous forest on the Mt. Gongga

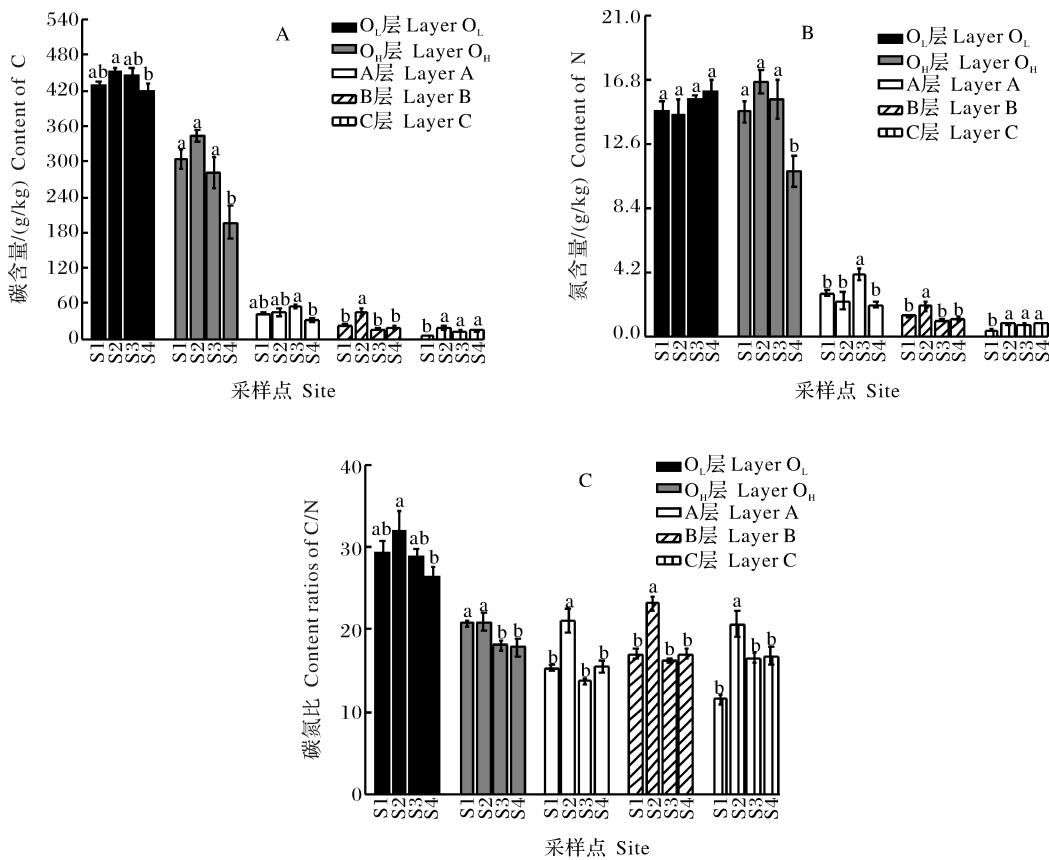


图 2 贡嘎山东坡针叶林各层 C 含量(A)、N 含量(B)及 C/N(C)的梯度分布特征

Fig.2 The altitudinal distributions of contents of C(A),N(B),and content ratios of C/N (C) in the coniferous forest on the Mt. Gongga

### 2.3 微生物量碳、氮含量及微生物量碳氮比

随海拔升高,  $O_H$  层 MBC、MBN 含量均呈降低趋势, 但矿质土层的 MBC、MBN 含量梯度变化趋势不明显(图 3)。A 层 MBC、MBN 含量均在 S3 样点最高, 在

S2 样点较低。B 和 C 层 MBC、MBN 含量在海拔梯度上均不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。与 MBC、MBN 含量相比, MBC/MBN 梯度趋势更弱, 各层 MBC/MBN 在海拔梯度上均不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。

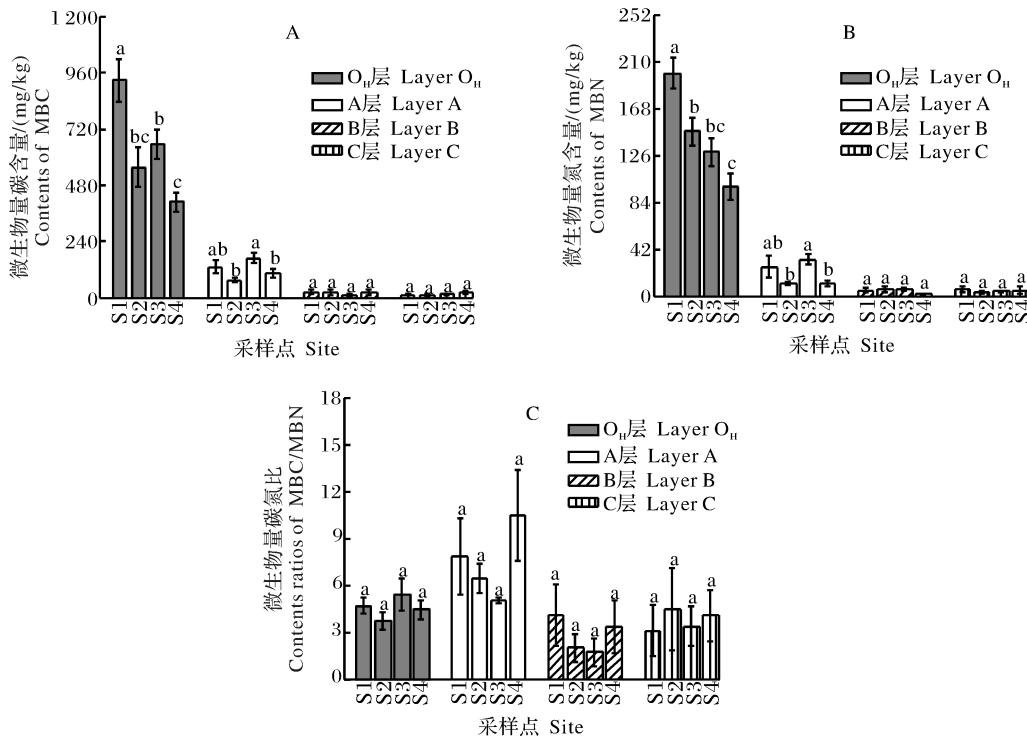


图 3 贡嘎山东坡针叶林各土层 MBC 含量(A), MBN 含量(B)和 MBC/MBN(C)的梯度分布特征

Fig.3 The altitudinal distributions of contents of MBC(A), MBN(B), and content ratios of MBC/MBN (C) in the coniferous forest on the Mt. Gongga

### 2.4 碳、氮分布特征的影响因素分析

RDA 分析(图 4)结果表明,  $O_H$  层 C、N 含量与  $C_{lit}$ 、土壤含水率呈显著正相关, 与 pH 呈显著负相关。A 层 C、N 含量与  $Al_{ox}$  含量呈显著负相关。B 和 C 层 C、N 含量与  $Fe_{ox}$  含量呈显著正相关。

### 2.5 已报道的不同地区土壤和微生物量碳、氮含量及碳氮比差异分析

对不同地区土壤和微生物量碳、氮含量与本研究结果进行对比分析, 发现本研究中 0~10 cm 矿质土层 C、N、MBC、MBN 含量明显偏低; 10~100 cm 矿质土层 C、N 含量明显偏高(表 1)。

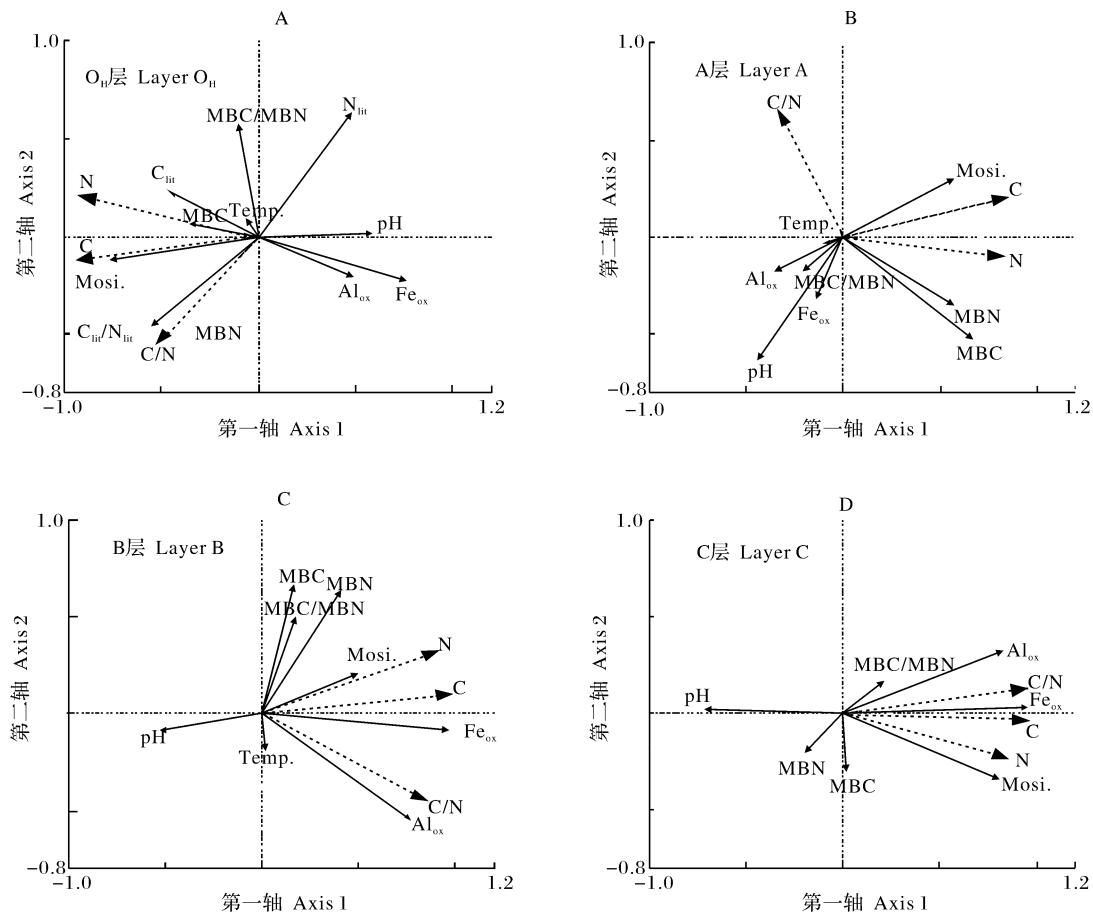
## 3 讨 论

贡嘎山 3 000 m 气象观测站长期监测发现天然降雨中 N 质量浓度极低(0.1 mg/L)<sup>[4]</sup>, 本研究主要考虑气候、凋落物输入和生物及地球化学输出对土壤 C、N 海拔分布特征的影响。

### 3.1 调落物层碳、氮海拔分布特征及影响因素

随海拔升高,  $O_H$  层的 C、N 含量与  $O_L$  层的  $C_{lit}$  含量均呈降低趋势(图 2), 且  $O_H$  层的 C、N 含量分别与  $C_{lit}$  含量显著正相关(图 4A)。此外,  $O_H$  层的 C、N 含量梯度变化趋势与  $O_L$  层的厚度、凋落物量和生物量的变化趋势基本一致<sup>[13,16]</sup>。研究区土壤母质和植被类型差异较小, 温度和降水存在明显的梯度差异<sup>[12]</sup>。随海拔升高, 土壤温度降低, 植物生物量和凋落物产量降低<sup>[13,16]</sup>, 土壤 C、N 来源减少, C、N 含量随之减少。因此,  $C_{lit}$  归还量是决定贡嘎山东坡亚高山针叶林  $O_H$  层 C、N 海拔分布特征的主要因素之一。

与小兴安岭谷地云冷杉林和黑龙江帽儿山 5 种温带森林 0~10 cm 矿质土层 MBC、MBN 含量的研究结果对比发现, 本研究中 MBC、MBN 含量明显偏低(表 1); 与全球 A 层 MBC/C、MBN/N 均值(分别为 1.2%、2.6%)相比, 本研究中的比值仍然偏小(分



$O_H$ 层环境因子包括凋落物碳、氮及碳氮比,微生物量碳、氮及碳氮比,土壤温度,土壤含水率,pH,Fe<sub>ox</sub>和Al<sub>ox</sub>。A和B层环境因子包括除凋落物碳、氮及碳氮比的 $O_H$ 层其他环境因子。C层环境因子包括除凋落物碳、氮及碳氮比、土壤温度的 $O_H$ 层其他环境因子。图中虚线箭头表示各层土壤碳、氮和碳氮比,实线箭头表示环境因子。Environmental variables of the  $O_H$  horizon include C<sub>lit</sub>, N<sub>lit</sub>, C<sub>lit</sub>/N<sub>lit</sub>, MBC, MBN, MBC/MBN, soil temperature (Temp.), soil moisture (Mosi.), pH, Fe<sub>ox</sub> and Al<sub>ox</sub>. Environmental variables of the A and B horizon are same with those of the  $O_H$  horizon except C<sub>lit</sub>, N<sub>lit</sub> and C<sub>lit</sub>/N<sub>lit</sub>. Environmental variables of the C horizon are same with those of the  $O_H$  horizon except C<sub>lit</sub>, N<sub>lit</sub>, C<sub>lit</sub>/N<sub>lit</sub> and soil temperature (Temp.). Dotted arrows represent soil C, N, and C/N; solid arrows represent environmental factors.

图4 贡嘎山东坡针叶林 $O_H$ 层(A)、A层(B)、B层(C)和C层(D)土壤碳、氮和碳氮比与环境因子的冗余分析

Fig.4 RDA of soil C, N and C/N with environment factors in the  $O_H$  horizon(A), A horizon(B), B horizon(C) and C horizon(D) in the coniferous forest on the Mt. Gongga

表1 不同地区土壤和微生物量碳、氮含量及碳氮比

Table 1 C, N contents and C/N in soils and microbial biomass of different areas

序号 No.	研究区 Study area	土壤 Soil			微生物量 Microbial biomass			参考文献 References
		C/(g/kg)	N/(g/kg)	C/N	MBC/(mg/kg)	MBN/(mg/kg)	MBC/MBN	
1 贡嘎山 Mt. Gongga	$O_H$ 层 $O_H$ layer	282.0 (15.6)	14.4 (0.7)	19.4 (0.5)	637.2 (51.6)	144.2 (9.8)	4.6 (0.3)	本研究 This study
	A层 A layer	43.2 (2.4)	2.8 (0.3)	16.4 (0.7)	118.8 (12.0)	21.0 (2.8)	7.5 (1.0)	
	B层 B layer	26.4 (2.4)	1.4 (0.1)	18.3 (0.7)	21.6 (4.8)	5.6 (1.4)	2.7 (0.7)	
2 贡嘎山 Mt. Gongga	C层 C layer	12.0 (1.2)	0.7 (0.0)	16.4 (0.9)	15.6 (2.4)	5.6 (1.4)	3.8 (0.9)	
	$O$ 层 $O$ layer	252.0 (14.4)	11.6 (0.7)	22.3 (1.3)				[9]
	A层 A layer	145.2 (14.4)	8.1 (0.6)	17.5 (1.0)	1149.6 (116.4)	161.0 (21.0)	8.7 (1.2)	
	B层 B layer	4.5 (0.8)	0.21 (0.03)	19.6 (0.9)				
	C层 C layer	1.3 (0.2)	0.07 (0.01)	18.7 (0.9)				

续表 1 Continued Table 1

序号 No.	研究区 Study area	土壤 Soil			微生物量 Microbial biomass			参考文献 References
		C/(g/kg)	N/(g/kg)	C/N	MBC/ (mg/kg)	MBN/ (mg/kg)	MBC/ MBN	
3	小兴安岭谷地云冷杉林 Valley spruce-fir forest, Xiao Hinggan Mountains	0~10 cm 矿质土层 0~10 cm mineral layer	60.0	6.0	9.9	606.0	95.2	6.3 [6]
4	黑龙江帽儿山 Maoershan, Heilongjiang Province	0~10 cm 矿质土层 0~10 cm mineral layer	85.2	5.2	16.9	876.0	99.4	9.1 [7]
5	中国 China	0~10 cm 10~50 cm 50~100 cm 均值 Average	24.0 14.4 7.2 10.8	1.8 1.4 0.7 1.1	12.3 10.5 9.6 10.2	— — — —	— — — —	[17]
6	全球 The global average	0~30 cm	57.6	4.1	14.1	680.4	105.0	6.5 [18]

注: 数值表示均值(标准误); “—”表示数据缺失。Note: Data are represented by the means (standard error); “—” indicates data deficiency.

别为 0.27% 和 0.76%)。此外, 各层 MBC/MBN 在海拔梯度上均不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ ) (图 3C)。由此可见, 4 个海拔梯度上的微生物活性均较弱。较低的土壤温度和 pH 值, 以及较高的土壤含水率(图 1), 可能是抑制微生物活性的主要原因<sup>[6-7]</sup>。随海拔升高, 土壤微生物活性虽然呈减弱趋势(图 3), 但在研究区冷、湿、酸性条件下微生物的分解活动整体较弱, 则  $O_H$  层 C、N 含量并没有呈增加趋势。

海拔梯度上  $O_H$  层的 C、N 含量均在 S2 样点较高, 这主要是由于该样点生物量最高( $568 \text{ t}/\text{hm}^2$ ), 且凋落物能够为土壤提供大量 C、N(图 2)。此外, S2 样点显著高于其他样点的含水率和过低的 pH 值 ( $P < 0.05$ ) (图 1), 导致微生物活性偏低, 更不利于微生物对凋落物的分解。

### 3.2 淋溶过程对矿质土层碳、氮海拔分布特征的影响

王琳等<sup>[1]</sup>(海拔 1 700~3 900 m) 和王良健<sup>[8]</sup>(海拔 1 400~3 100 m) 都发现了矿质土层 C、N 含量随海拔升高而增大的趋势, 认为气候和植被类型是影响贡嘎山东坡土壤 C、N 空间分布的主要因素。以上研究跨越了多个植被类型、海拔跨度比本研究大得多。本研究中矿质土层 C、N 含量并未如  $O_H$  层一样呈现梯度变化趋势(图 2), 且矿质土层与  $O_H$  层的土壤理化性质存在较大差异(图 1)。因此, 存在除  $C_{lit}$  归还量和微生物活性外的其他因素影响了矿质土层 C、N 的海拔分布。

He 等<sup>[10]</sup>对贡嘎山东坡的研究发现, 山地棕壤

和暗棕壤中具有较明显的淋溶过程, 导致土壤溶质快速、大量迁移<sup>[11]</sup>。本研究在采样过程中也发现了灰白色淋溶层和较厚的鲜棕色淀积层。此外, A 层 pH 值较低, B 层  $\text{Fe}_{ox}$ 、 $\text{Al}_{ox}$  含量显著升高(图 1), 均是本研究区发生了淋溶过程的有力证据。与 Bing 等<sup>[9]</sup>对贡嘎山针叶林土壤的研究结果对比, 本研究中 A 层 C、N 含量偏低(表 1)。根据贡嘎山 3 000 m 气象观测站长期监测的地表水和地下水数据发现, 天然降雨中 C、N 含量( $\text{CO}_3^{2-}$  含量低于检出限,  $\text{HCO}_3^-$  含量为  $6.7 \text{ mg/L}$ , N 含量为  $0.1 \text{ mg/L}$ ) 明显低于壤中流中 C、N 含量( $\text{CO}_3^{2-}$  含量为  $35.3 \text{ mg/L}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  含量为  $367.5 \text{ mg/L}$ , N 含量为  $3.9 \text{ mg/L}$ )。本研究区是贡嘎山东坡降水量最大的区域, 较大的降水量和相对“年轻”的土壤<sup>[12]</sup>, 有利于淋溶过程的发生, 对矿质土层 C、N 的海拔分布规律产生了影响。

由 A 至 B 层土壤 C/N 均值依次为 16.4 和 18.3, 贡嘎山 3 000 m 气象观测站监测的数据也发现壤中流的 C 含量明显高于 N 含量, 因此, 由淋溶过程造成 C 的垂直迁移量大于 N 的迁移量。将 C 层 ( $> 50 \text{ cm}$ ) 土壤 C、N 含量与全国 50~100 cm 的土壤进行对比(表 1), 发现本研究中 C 层的 C 含量和 C/N 偏高。本研究区土壤较“年轻”, 薄铁盘层并未完全形成, 不能将 C、N 全部蓄积于 B 层土壤中<sup>[10]</sup>, 因此, 仍有部分 C、N 随淋溶过程迁移至土壤 C 层, 且 C 的迁移量大于 N 的迁移量。A 层  $\text{Fe}_{ox}$ 、 $\text{Al}_{ox}$  含量与 C、N 含量均呈负相关, 而在 B 和 C 层中均呈正相关(图 4), 表明土壤 C、N 随  $\text{Fe}_{ox}$ 、 $\text{Al}_{ox}$  淋溶

下渗,并在B层和C层累积。

与凋落物层相比,A层中C、N含量并未出现随海拔升高而降低的趋势,干扰A层C、N梯度变化趋势的原因是该层S2样点C、N含量较低(图2)。由上述分析可知,S2样点的生物量、凋落物输入量均较高,微生物分解速率较低,该点A层C、N含量应较高。然而,研究结果发现该点A层的C、N含量较低,说明S2样点的C、N通过淋溶迁移的流失量较高。S2样点的淋溶作用更强,导致B层C含量高于A层(分别为44.7和44.0 g/kg),主要由以下证据支持:首先,S2样点B层与A层 $\text{Fe}_{\text{ox}}$ 含量比值比其他样点高(S2为3.89,S1、S3和S4依次为0.83、1.04和0.94);其次,该样点B层与A层 $\text{Al}_{\text{ox}}$ 含量比值较高(S2为4.50,其他样点依次为1.40、1.54和1.44);再次,同一土层中S2样点土壤pH值显著小于其他样点( $P<0.05$ ),这是由于淋溶作用较强,导致碱基离子流失量较大的结果<sup>[10]</sup>。S2样点较强的淋溶作用,导致该样点B层中C、N大量累积且显著高于其他样点( $P<0.05$ )(图2)。经过B层的淀积作用,虽然仍有部分C、N迁移至C层,但C层的C、N含量在S2、S3和S4样点均不存在显著性差异( $P<0.05$ )。综上可知,淋溶作用的强弱导致矿质土壤中C、N由A层迁移至B层累积的通量不同,干扰了贡嘎山东坡针叶林矿质土壤C、N在海拔梯度上的分布。

## 参考文献 References

- [1] 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. WANG L, OUYANG H, ZHOU C P, 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 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张淑香,张文菊,徐明岗.土壤活性有机碳的影响因素与综合分析[J].中国农业科学,2020,53(6):1178-1179. ZAHNG S X, ZHANG W J, XU M G. Influencing factors and comprehensive analysis of soil active organic carbon[J]. Scientia agricultura sinica, 2020, 53 (6): 1178-1179 (in Chinese).
- [3] 程丽.淹水对三峡库区消落带土壤氮形态分布及相关酶、细菌的影响[D].武汉:华中农业大学,2016. CHENG L. Effects of flooding on soil nitrogen morphology distribution and related enzymes and bacteria in the Three Gorges Reservoir area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王玉珏,赵佳宁,于洋,等.不同纬度兴安落叶松林土壤碳氮含量特征及影响机制[J].中央民族大学学报(自然科学版),2020,29(2):13-20. WANG Y J, ZHAO J N, YU Y, et al. Characteristics and influence factors of soil carbon and nitrogen content in Gmelin larch forests at different latitudes[J]. Journal of MUC (natural sciences edition), 2020, 29 (2): 13-20 (in Chinese with English abstract).
- [5] 黄传琴,熊娟,常明慧,等.土壤腐殖酸与碳酸盐相互作用过程研究[J].华中农业大学学报,2018,37(6):58-65. HUANG C Q, XIONG J, CHANG M H, et al. Interaction process between soil humic substance and carbonate[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37 (6): 58-65 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘纯,刘延坤,金光泽.小兴安岭6种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J].生态学报,2014,34(2):451-459. LIU C, LIU Y K, JIN G Z. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxing'an Mountain, China[J]. Acta ecological sinica, 2014, 34 (2): 451-459 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘爽,王传宽.五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J].生态学报,2010,30(12):3135-3143. LIU S, WANG C K. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems[J]. Acta ecological sinica, 2010, 30 (12): 3135-3143 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王良健.贡嘎山东坡森林土壤有机质的垂直分布规律研究[J].国土与自然资源研究,1994(3):29-33. WANG L J. A study on the vertical distribution law of forest soil organic matters on the east slope of Gongga Mountain[J]. Territory and natural resources study, 1994 (3): 29-33 (in Chinese with English abstract).
- [9] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of soils and sediments, 2016, 16 (2): 405-416.
- [10] HE X L, ZHOU J, WU Y H, et al. Leaching disturbed the altitudinal distribution of soil organic phosphorus in subalpine coniferous forests on Mt. Gongga, SW China[J]. Geoderma, 2018, 326: 144-155.
- [11] 梁建宏,吴艳宏,周俊,等.土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价[J].农业机械学报,2017,48(1):220-227. LIANG J H, WU Y H, ZHOU J, et al. Quantitative evaluation of effect of soil types on preferential flow pathways and soil phosphorus forms[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48 (1): 220-227 (in Chinese with English abstract).
- [12] WU Y H, LI W, ZHOU J, et al. Temperature and precipitation variations at two meteorological stations on eastern slope of Gongga Mountain, SW China in the past two decades[J]. Journal of mountain science, 2013, 10 (3): 370-377.
- [13] 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. LUO J, YANG Z, YANG Q W. A study of the biomass and production of forest on the Gongga Mountain[J]. Acta phytocologica sinica,2000,24(2): 191-196 (in Chinese with English abstract).
- [14] CARTER M R, GREGORICH E G. Soil sampling and methods of analysis[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006; 307-316.
- [15] BROOKES P C, POWLSON D S, JENKINSON D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. Soil biology biochemistry, 1982, 14(4): 319-329.
- [16] 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. LUO J, CHENG G W, CHEN B R, et al. Characteristic of forests litterfall along vertical spectrum on the Gongga Mountain[J]. Journal of mountain science, 2003, 21(3): 287-292 (in Chinese with English abstract).
- [17] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C/N/P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [18] XU X F, THORNTON P E, POST W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. Global ecology biogeography, 2013, 22(6): 737-749.

## Effects of leaching process on characteristics of altitudinal distribution of soil carbon and nitrogen in subalpine coniferous forest

HE Xiaoli<sup>1</sup>, WU Yanhong<sup>2</sup>, ZHOU Jun<sup>2</sup>, MA Tingting<sup>1</sup>

1. College of Resource, Environment and Tourism, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences / Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China

**Abstract** In order to reveal the importance of leaching on mountainous nutrients cycling, the characteristics of altitude distribution of soil C and N in the coniferous forest at an altitude of 2 600-3 200 m on the eastern slope of the Gongga mountain were studied. The soil C, N content and C/N of the conifers at 4 sampling points at different altitudes were analyzed. Combined with other soil physical, chemical and biological indicators, the effects of the leaching process on the characteristics of altitudinal distribution of soil C and N were explored. The results showed that the spatial distributions of C, N contents and C/N in the humified litter horizon ( $O_H$  horizon) exhibited a similar decreasing trend with the increase of altitude. Since the content of C in litters ( $C_{lit}$ ) was positively correlated with soil C and N in the  $O_H$  horizon ( $P < 0.05$ ), the production of  $C_{lit}$  was the main factor affecting the altitudinal distributions of soil C and N in the  $O_H$  horizon. The obvious altitudinal trend was not observed for soil C, N contents and C/N in the mineral horizons (A, B and C horizon). The contents of soil C and N in the A horizon were lower than those in the 2 781 m site, while the maximums were for the B and C horizon in this site. The contents of soil C and N in the rainfall were significantly lower than those in the interflow, which showed the effects of leaching on the spatial distributions of soil C and N. It is indicated that the effects of leaching process on the spatial distributions of soil C and N in subalpine coniferous forest in Southwest Asia can not be ignored.

**Keywords** C, N altitudinal distributions; leaching; coniferous forest soils; subalpine; mountain nutrient cycling; C, N biogeochemical cycles

(责任编辑:赵琳琳)