

DOI: 10.11766/trxb201604140096

太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征*

李丹维¹ 王紫泉¹ 田海霞¹ 和文祥^{1, 2†} 耿增超¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 为探究太白山土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量垂直分布特征, 阐明土壤C、N、P生态化学计量学特征对海拔梯度的响应规律, 在秦岭太白山1 700~3 500 m区域以100 m海拔间隔进行研究。结果表明: (1) 不同海拔高度下土壤有机碳、全氮、全磷变化范围分别是23.56~83.59 g kg⁻¹、2.00~5.77 g kg⁻¹、0.32~0.47 g kg⁻¹。土壤有机碳与全氮含量随海拔梯度升高先增后降, 土壤全磷含量空间变异较小; (2) 土壤C:N、C:P、N:P范围分别为7.17~18.41、60.61~190.4、5.81~12.26。随海拔增加, 土壤C:N在阔叶林带呈降低趋势, 针叶林带时转变为增加趋势。土壤C:P随海拔梯度的变化趋势与土壤C:N类似, N:P随海拔梯度增加先升后降, 至3 200 m有所升高; (3) 两个阔叶林带(辽东栎林带和桦木林带)与高山草甸的土壤C、N含量及生态化学计量比高。冷杉林带C、N含量及其生态化学计量比最小; (4) 温度、含水量、海拔和植被对土壤C、N、P化学计量特征具有重要影响, 通过冗余分析揭示每个因素分别可解释系统变异信息的25.0%、24.3%、11.1%和6.9%, 合计为67.3%。可见这些环境因素直接决定了土壤养分及生态化学计量特征。结果可为探明森林土壤养分供应状况和限制因素及太白山生态系统的保护、森林土壤质量评价等提供基础。

关键词 海拔高度; 太白山; 土壤养分; 化学计量特征; 植被类型

中图分类号 S714.2 **文献标识码** A

生态化学计量学是一门研究生态系统中能量平衡和多重化学元素平衡的科学, 在生态系统生产力制约因素以及物质(特别是碳(C)、氮(N)和磷(P))循环等方面得到广泛应用。借助于生态化学计量学这一研究工具开展生态系统C、N、P养分分布^[1]、循环^[2]及养分限制指示^[3]等研究, 对于揭示生态系统过程影响因素及其作用机制具有重要意义。目前有关森林生态系统化学计量特征的

文献主要针对区域乃至全球范围内植物器官(叶片、细根和凋落物等)和植被C、N、P化学计量空间分布格局的研究^[4]。此外, 也有学者对土壤化学计量特征进行了大量的研究^[5-6]。这些研究对丰富生态系统化学计量特征起到了关键作用^[7]。然而, 这些研究一般针对不同纬度森林生态系统土壤生态计量学特征, 已有结果表明土壤C:N在不同纬度梯度上无明显变化, 受气候变化影响较小, 而

* 国家公益性行业(林业)科研专项(201304307)、国家自然科学基金项目(41571245)和西北农林科技大学“基本科研业务费科研创新重点项目”(ZD2013012)共同资助 Supported by the Special Fund for Forest Science Research in the Public Interest (No.201304307), the National Natural Science Foundation of China (No.41571245), and the “Basic Scientific Research Expenses of Major Project of Scientific Research Innovation” of Northwest Agriculture and Forestry University (No. ZD2013012)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wxhe1968@163.com

作者简介: 李丹维(1990—), 女, 陕西杨凌人, 硕士研究生, 主要从事土壤酶研究。E-mail: 422788302@qq.com

收稿日期: 2016-04-14; 收到修改稿日期: 2016-06-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-07-14

土壤C:P、N:P随纬度的升高显著下降且变异性较大^[8-10]。

近年来，围绕海拔梯度上自然林土壤养分组成的分布和变化等研究逐渐增多，这是因为海拔梯度变化作为一种自然地理变化，对森林土壤理化性质、植被分布以及因植被密度不同导致凋落物量的变化均有较大影响^[11]，而这些因素又会直接或间接地影响森林土壤碳库大小及碳库组成^[12]。因此，研究森林土壤养分及其计量学特征随海拔的变化是非常必要的。张广帅等^[13]对亚热带不同海拔土壤研究表明土壤C:N与纬度梯度上的土壤生态化学计量学特征结果一致，C:P和N:P则随海拔升高呈增加趋势。而Nottingham等^[14]对热带不同海拔梯度土壤研究发现C:N、C:P和N:P均随海拔升高而增加，且C:P和N:P具有更高空间变异特征。可见不同海拔梯度土壤生态化学计量特征尚存争议。因此有必要探明秦岭不同海拔梯度森林土壤化学计量学特征。

秦岭是我国南北气候天然的分界线，是重要的森林生态区。其主峰太白山海拔高，气候和植被垂直特征明显，是我国广域植被水平地带性（北亚热带到寒温带）的缩影，是在较小区域内研究多种类型森林生态系统的理想区域^[15]。已有研究表明该地区森林土壤pH、有机质、全氮和有效磷含量与海拔高度之间存在相关性^[16]。但这些研究仅涉及低山温带季风气候带和中山寒温带季风气候带森林土壤养分特征，缺乏对高山亚寒带气候带（3 000~3 350 m）和高山寒带气候带（>3 350 m）的研究。且对该区域土壤化学计量特征的空间分布格局的研究更是鲜见报道。由于秦岭海拔相对高差较大，气候和植被类型垂直变化分异明显，因此揭示土壤各组分的化学计量特征及其相互关系和空间变异，有助于深入认识C、N、P生物地球化学循环的特征。

为此，本文采集太白山北坡不同海拔高度（1 700~3 500 m）土壤，测定土壤C、N、P等养分含量，以生态化学计量学方法探讨太白山北坡土壤C、N、P养分垂直分布特征，分析海拔对土壤养分及生态化学计量特征的影响，为太白山森林土壤养分供应状况及限制情况提供参考，也可为太白山生态系统的保护提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太白山为秦岭主峰，海拔3 767 m。其北坡年降水量为694.2 mm，年均温13℃^[15]。研究区内植被类型丰富，垂直地带性明显，具有不同典型植被林带（锐齿栎、辽东栎、桦木林、冷杉林、落叶松和高山草甸）。

1.2 土壤样品采集

2014年8月以100 m海拔间隔，采集太白山北坡1 700~3 500 m海拔梯度的土样。在研究区内选取地形、地貌、坡度和坡向等基本一致的标准样地，按照“S”型方法选择5个点进行采样。采样时先去除枯枝落叶，然后用土钻采集0~10 cm土样，将5点土样混合均匀后装入自封袋。每个样地内2个重复，共采集38个土壤样品。

1.3 测定方法

采样同时用水银温度计测定土壤温度，土壤水分速测仪（TDR-3型，剑桥，英国）测定土壤含水量。

土壤风干过0.1 mm筛后常规方法测定土壤基本性质，其中土壤pH：电位法（水土比为2.5:1）；含水量：105℃烘干法；土壤有机碳：重铬酸钾外加热法；全氮：凯氏定氮法；全磷：钼锑抗比色法。结果见表1。

1.4 数据处理

本研究中土壤C:N:P比均为元素质量比。采用Microsoft Excel 2003和SPSS 22.0软件分析数据，显著性分析采用最小显著差异法（LSD法），相关分析采用皮尔森（Pearson）双尾检验。采用CANOCO（Version 5.0）对土壤养分及地形因子进行冗余分析（RDA）排序，并绘制二维排序图。

2 结果

2.1 土壤C、N、P含量与垂直分布特征及其相关性

对不同海拔梯度土壤有机碳、全氮、全磷含量进行分析（表1）。可看出，随海拔梯度增加，有机碳、全氮、全磷含量表现为不同的变化规律。其中，不同海拔土壤有机碳含量变化范围

表1 太白山不同海拔高度土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in different altitudes at Taibai Mountain

海拔 Altitude (m)	植被类型 Vegetation type	pH	含水量 Water content (%)	温度 Temperature (°C)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹)
3 420	高山草甸 Alpine meadow	5.15 ± 0.47a	44.98 ± 5.17ab	8.00 ± 0.94i	49.54 ± 1.96bcd	3.38 ± 0.16bcd	0.42 ± 0.05abcd
3 384	落叶松林带	5.09 ± 0.06a	52.73 ± 19.28a	8.50 ± 0.24hi	50.93 ± 7.84bc	3.33 ± 0.62bcde	0.41 ± 0.07abcd
3 270	Larch forest	5.40 ± 0.24a	37.43 ± 5.15abc	8.00 ± 0.00i	32.05 ± 7.59cdef	2.31 ± 0.53fgh	0.36 ± 0.05bcd
3 203		5.50 ± 0.18b	30.62 ± 2.10bc	8.00 ± 0.00i	26.76 ± 2.57cdef	2.00 ± 0.20h	0.40 ± 0.01a
3 096		5.54 ± 0.08a	37.17 ± 1.54abc	10.00 ± 0.00fgh	38.28 ± 5.14cdef	2.39 ± 0.11fgh	0.32 ± 0.01d
2 999	冷杉林带	5.68 ± 0.04a	32.08 ± 12.58abc	9.94 ± 0.05fgh	23.56 ± 11.76ef	2.45 ± 0.77efgh	0.30 ± 0.03abcd
2 903	Fir forest	5.18 ± 0.02b	30.65 ± 0.59bc	11.00 ± 0.00fg	23.66 ± 2.28f	2.10 ± 0.22gh	0.36 ± 0.08bcd
2 810		5.58 ± 0.21a	41.09 ± 6.30abc	9.50 ± 0.94ghi	29.31 ± 3.14cdef	2.70 ± 0.05defgh	0.34 ± 0.02cd
2 712	桦木林带	5.41 ± 0.06a	39.97 ± 2.23abc	11.54 ± 0.75ef	24.25 ± 5.88def	3.38 ± 0.01bcd	0.40 ± 0.02abcd
2 615	Birch forest	5.54 ± 0.42a	25.25 ± 0.02bc	12.83 ± 0.71de	25.76 ± 5.71cdef	3.38 ± 0.00i	0.35 ± 0.04bcd
2 520		5.52 ± 0.13a	43.23 ± 12.57ab	12.92 ± 0.59de	43.48 ± 12.98cdef	3.35 ± 0.83bcde	0.34 ± 0.03cd
2 416		5.71 ± 0.45a	34.77 ± 2.31abc	13.67 ± 0.00cd	45.77 ± 2.58cde	3.72 ± 0.02bc	0.44 ± 0.15abc
2 284		5.96 ± 0.13a	44.10 ± 19.05ab	13.75 ± 0.01cd	83.59 ± 37.02a	4.54 ± 0.25b	0.44 ± 0.05abcd
2 200	辽东栎林带	5.77 ± 0.46a	52.81 ± 7.62a	14.50 ± 0.70bcd	72.08 ± 12.53ab	5.77 ± 0.56a	0.47 ± 0.01ab
2 097	Quercus	5.58 ± 0.74a	32.55 ± 4.44abc	15.50 ± 0.01ab	35.73 ± 0.42cdef	3.18 ± 0.00bedef	0.40 ± 0.01abcd
2 001	liaotungensis forest	5.40 ± 0.16b	28.81 ± 17.90bc	15.00 ± 0.50abc	44.74 ± 0.98cde	2.98 ± 0.36cdefg	0.43 ± 0.08abcd
1 896		5.43 ± 0.00b	26.35 ± 0.00bc	15.50 ± 0.17ab	39.35 ± 14.98cdef	2.56 ± 1.01defgh	0.41 ± 0.13cd
1 818	锐齿栎林带	5.73 ± 0.03c	21.33 ± 8.09c	15.50 ± 0.21ab	44.85 ± 2.21bcd	2.75 ± 0.00defgh	0.40 ± 0.03abcd
1 712	Quercus acutidentata forest	5.73 ± 0.02bc	28.82 ± 17.72bc	16.50 ± 0.69a	37.34 ± 24.81cdef	2.92 ± 0.02cdefg	0.38 ± 0.01abcd
	平均值 Mean	5.52	36.04	12.11	40.58	3.11	0.39
	标准差 Standard deviation	0.22	8.88	2.94	15.98	0.89	0.04
	最大值 Maximum	6.00	52.80	16.50	83.59	5.77	0.47
	最小值 Minimum	5.10	21.30	8.00	23.56	2.00	0.32
	变异系数 Coefficient of variance	0.04	0.25	0.24	0.39	0.29	0.10

注: 同列不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 下同 Note: Different letters within the same column mean significant differences ($p < 0.05$). The same below

为 $23.56 \sim 83.59 \text{ g kg}^{-1}$ ，均值为 40.58 g kg^{-1} ，变异系数为 39.37% 。土壤有机碳含量随海拔增加呈先增后降的趋势。土壤有机碳含量在中海拔（ $2\ 200 \sim 2\ 300 \text{ m}$ ）明显高于其他海拔（ $1\ 700 \sim 2\ 100 \text{ m}$ 、 $2\ 400 \text{ m} \sim 3\ 300 \text{ m}$ ）。海拔 $1\ 700 \sim 2\ 100 \text{ m}$ 与 $2\ 600 \sim 3\ 300 \text{ m}$ 的土壤有机碳含量变化并不明显，至 $3\ 400 \text{ m}$ 处有机碳含量小幅度增加。

随海拔梯度增加，土壤全氮含量先增后降，变化范围为 $2.00 \sim 5.77 \text{ g kg}^{-1}$ ，均值为 3.11 g kg^{-1} ，变异系数为 28.65% 。土壤全氮含量与有机碳含量垂直分布特征相似，最高含量出现在 $2\ 200 \text{ m}$ ，最低

含量出现在 $3\ 203 \text{ m}$ ，且至海拔 $3\ 400 \text{ m}$ 时含量有所增加。

土壤全磷含量随海拔梯度增加无明显变化趋势，全磷含量变化范围为 $0.32 \sim 0.47 \text{ g kg}^{-1}$ ，平均为 0.39 g kg^{-1} ，变异系数 10.34% 。土壤全磷含量空间变异较小。

对不同海拔梯度土壤有机碳、全氮、全磷含量进行相关分析（图1），结果显示土壤有机碳、全氮、全磷三者间极显著相关，决定系数 R^2 分别为 0.592 （ $p=0.000$ ）、 0.363 （ $p=0.004$ ）、 0.366 （ $p=0.004$ ）。从空间尺度上，土壤有机碳、全氮

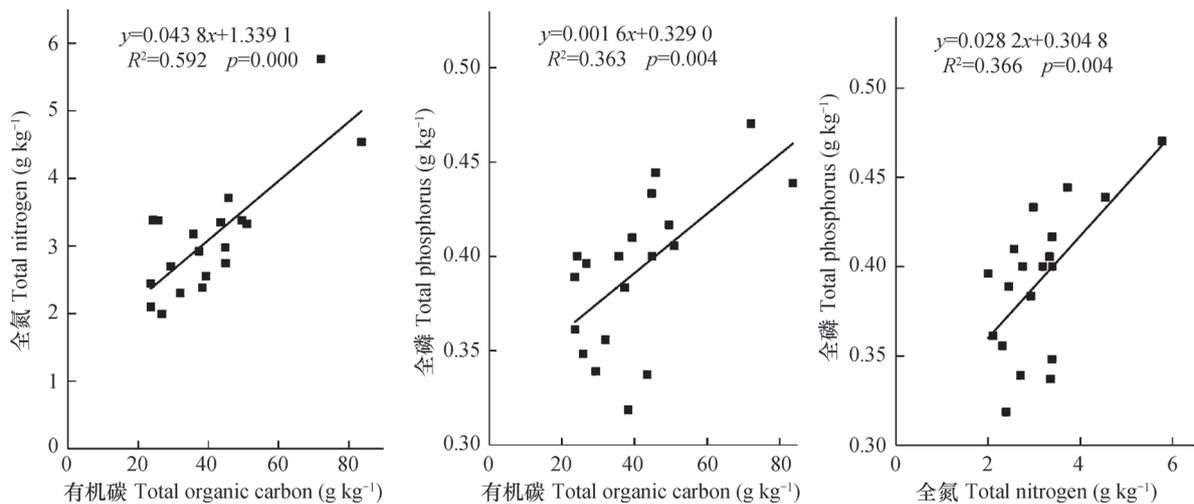


图1 不同海拔土壤有机碳、全氮、全磷元素相关性

Fig. 1 Correlation of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus relative to elevation

含量随海拔梯度变化同步。表明太白山森林土壤有机碳、全氮、全磷分布在一定程度上相互耦合。

2.2 不同海拔土壤C、N、P生态化学计量特征

对不同海拔梯度土壤C、N、P生态化学计量比C:N、C:P、N:P进行分析（图2），其中，土壤C:N变化范围为 $7.17 \sim 18.41$ ，均值为 12.99 ，变异系数为 22.54% 。C:N在海拔 $2\ 712 \text{ m}$ 最低（ 7.17 ），在 $2\ 284 \text{ m}$ 最高（ 18.41 ），增加 2.57 倍。随海拔升高，土壤C:N在阔叶林带呈降低趋势，林带转变为针叶林带时呈增加趋势。除海拔 $2\ 097 \text{ m}$ 、 $2\ 600 \sim 3\ 000 \text{ m}$ 外，其他海拔高度土壤C:N均高于全球森林 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤C:N均值 12.4 [17]。

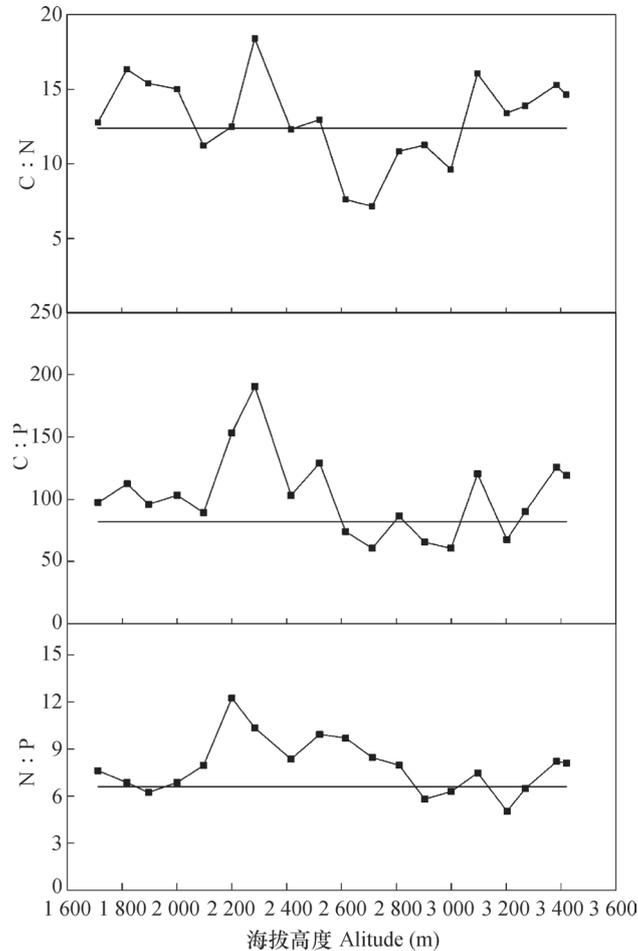
土壤C:P范围为 $60.61 \sim 190.4$ ，平均值 102.2 ，变异系数 32.42% 。土壤C:P随海拔梯度的变化趋势与土壤C:N类似，其在海拔 $2\ 284 \text{ m}$ 最大，且 $2\ 200 \sim 2\ 300 \text{ m}$ 的土壤C:P高于全球森林

$0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤C:P均值（ 81.9 ） [17]。

土壤N:P范围为 $5.81 \sim 12.26$ ，平均值 7.90 ，变异系数 22.21% 。N:P随海拔梯度增加先升后降，至 $3\ 200 \text{ m}$ 有所升高。与C:P类似，土壤N:P在 $2\ 200 \sim 2\ 300 \text{ m}$ 海拔梯度的值高于全球森林 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤N:P均值（ 6.6 ） [17]。

2.3 不同林带土壤C、N、P含量及生态化学计量特征

典型植被林带随海拔梯度增加由阔叶林带向针叶林带演替，因此对不同植被带的土壤有机碳、全氮、全磷含量与生态化学计量比进行了分析（表2）。结果表明，土壤有机碳含量变化范围为 $23.84 \sim 49.54 \text{ g kg}^{-1}$ ，均值为 39.82 g kg^{-1} ，变异系数为 22.58% 。有机碳含量在不同林带的大小为：高山草甸 > 辽东栎林带 > 锐齿栎林带 > 桦木林带 > 落叶松林带 > 冷杉林带，冷杉林带土壤有机碳含量



注：横线为全球森林土壤（0~10 cm）C : N、C : P、N : P均值 Note: The horizontal line stands for average C : N, C : P and N : P of the global forest soil (0 ~ 10 cm)

图2 太白山不同海拔土壤C : N、C : P、N : P特征

Fig. 2 Stoichiometric characteristics of soil C : N, C : P and N : P in the Taibai Mountain relative to elevation

显著低于高山草甸与3个阔叶林带（锐齿栎林带、辽东栎林带、桦木林带）（ $p < 0.05$ ）。

土壤全氮含量变化范围为2.42 ~ 3.62 g kg^{-1} ，均值为2.97 g kg^{-1} ，变异系数为16.17%。全氮含量在不同林带的大小为：辽东栎林带 > 高山草甸 > 桦木林带 > 锐齿栎林带 > 落叶松林带 > 冷杉林带，2个针叶林带（冷杉林带、落叶松林带）的土壤全氮含量显著低于辽东栎林带（3.62 g kg^{-1} ）与高山草甸（3.38 g kg^{-1} ），与其他林带无显著差异（ $p > 0.05$ ）。

土壤全磷含量变化范围为0.36 ~ 0.42 g kg^{-1} ，均值为0.39 g kg^{-1} ，变异系数为4.43%。全磷含量在林带的大小为：高山草甸 > 锐齿栎林带 > 落叶松林带 > 桦木林带 > 辽东栎林带 > 冷杉林带，各林带土壤全磷含量无显著差异（ $p > 0.05$ ）。

从锐齿栎林带向高山草甸演替的过程中，土壤C : N先减小而后增加，变化范围为9.80 ~ 15.49，均值为13.36，变异系数为15.76%。冷杉林带土壤C : N显著低于高山草甸、落叶松林带与锐齿栎林带（ $p < 0.05$ ）。土壤C : P变化范围为67.01 ~ 119.40，均值为100.80，变异系数为18.98%。冷杉林带土壤C : P最小，显著低于高山草甸与辽东栎林带（ $p < 0.05$ ）。土壤N : P变化范围为6.32 ~ 9.21，均值为7.54，变异系数为14.06%。辽东栎林带土壤N : P最大，显著高于锐齿栎林带与2个针叶林带（落叶松林带和冷杉林带， $p < 0.05$ ）。

冷杉林带有机碳、全氮含量普遍较低，且其生态化学计量比同样较小。2个阔叶林带（辽东栎林带和桦木林带）与高山草甸的土壤有机碳、全氮含

表2 不同典型林带土壤有机碳、全氮、全磷含量及生态化学计量特征

Table 2 Contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus and their eco-stoichiometric characteristics relative to type of vegetation

植被类型 Vegetation type	海拔 Altitude (m)	有机碳 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹)	碳氮比 C : N ratio	碳磷比 C : P ratio	氮磷比 N : P ratio
高山草甸 Alpine meadow	3 400 ~ 3 600	49.54 ± 1.96a	3.38 ± 0.16ab	0.42 ± 0.05a	14.66a	119.4a	8.15ab
落叶松林带 Larch forest	3 000 ~ 3 400	37.01 ± 1.93ab	2.51 ± 0.36c	0.40 ± 0.03a	14.87a	93.72ab	6.32b
冷杉林带 Fir forest	2 800 ~ 3 000	23.84 ± 5.72b	2.42 ± 0.35c	0.36 ± 0.04a	9.80b	67.01b	6.75b
桦木林带 Birch forest	2 200 ~ 2 800	39.44 ± 5.29a	3.07 ± 0.22abc	0.39 ± 0.03a	12.80ab	99.90ab	7.81ab
辽东栎林带 Quercus liaotungensis forest	1 800 ~ 2 200	45.47 ± 6.74a	3.62 ± 0.48a	0.39 ± 0.01a	12.55ab	115.7a	9.22a
锐齿栎林带 Quercus acutidentata forest	≤ 1 800	43.59 ± 11.30a	2.81 ± 0.01bc	0.40 ± 0.01a	15.49a	109.1ab	7.02b

量较高且生态化学计量比高。可见，随海拔梯度增加而改变的植被类型对土壤有机碳、全氮含量分布以及生态化学计量特征具有重要影响。

2.4 环境因子对土壤C、N、P生态化学计量比的影响

对环境因子与土壤有机碳、全氮、全磷含量及生态化学计量比等进行冗余分析(RDA)，得到环境因子对土壤C、N、P化学计量特征影响的排序(图3)。土壤C、N、P化学计量特征分别第I、II排序轴解释系统的变异信息量分别为57.94%和9.21%，累积解释量达到67.15%。海拔、温度、植被和土壤含水量等环境因子影响了土壤有机碳、全氮、全磷含量及化学计量特征。海拔与土壤有机碳、全氮、全磷含量及C:N、C:P、N:P比呈负相关，相关性大小为：有机碳>全氮>全磷。温度、含水量与土壤有机碳、全氮、全磷含量及C:N、C:P、N:P比呈正相关。

各因子的贡献率见表3，可看出，对土壤C、N、P化学计量特征影响的大小为：温度>含水量>海拔>植被，解释变异信息的量分别为25.0%、24.3%、11.1%和6.9%。温度极显著影响土壤C、N、P化学计量特征($p < 0.01$)，含水量和海拔显著影响土壤C、N、P化学计量特征($p < 0.05$)。

表3 环境因子解释量及显著性检验

Table 3 Explanation rate of environmental factors and Duncan test

环境因子 Environmental factors	环境因子解释量 Explanation rate (%)	F	p
温度 Temperature	25.00	7.90	0.006
含水量 Water content	24.30	5.50	0.018
海拔 Elevation	11.10	4.80	0.026
植被 Vegetation	6.90	2.40	0.108

3 讨论

3.1 土壤有机碳、全氮、全磷垂直变异特征

土壤养分是森林生态系统中植物营养的主要来源，森林物种组成、群落结构及生产力均受土壤养分的影响。土壤养分的空间分布呈现一定的海拔梯度特征^[18]。森林土壤碳主要取决于凋落物的矿化分解与转化累积，氮含量来源于氮素矿

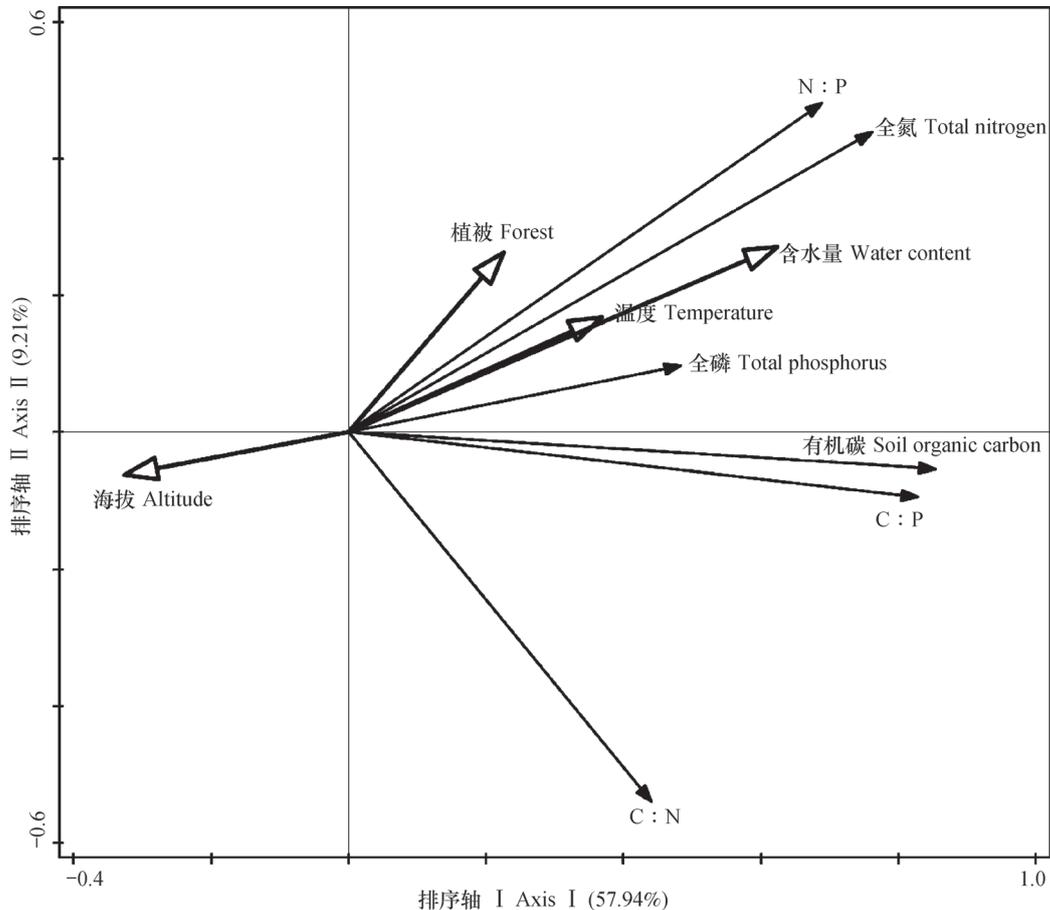


图3 环境因子与土壤有机碳、全氮、全磷含量及生态化学计量比RDA分析二维排序图

Figure 3 Two-dimensional sequence diagram of the RDA analysis of environmental factors, soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and eco-stoichiometric characteristics

化与固定、硝化与反硝化等过程^[13]，与有机质的空间分布具一致性。本研究中土壤有机碳和全氮含量分别为 40.58 g kg^{-1} 、 3.11 g kg^{-1} ，高于我国0~10 cm土壤有机碳、全氮含量均值 24.56 g kg^{-1} 、 1.88 g kg^{-1} ^[5]，这与赵维俊等^[19]在祁连山云杉林土壤的研究一致。气候条件与植被类型综合影响有机质的累积与分布特征，已有研究表明：低温可促进森林土壤碳的累积，地下细根生物量增加以及树种不同带来较大的生物量输入均可增加碳库累积^[12]。在本研究区，随海拔增加，土壤温度降低，植被类型由阔叶过渡为针叶，植被茂盛程度减弱，使得不同林带凋落量与凋落物的性质截然不同。低海拔地区阔叶林带凋落量大，进入土壤的有机质较多，但低海拔地区降雨量高，湿润地区具有较强的生物化学循环过程，促进土壤有机质矿化。一系列综合原因致使输入至不同海拔梯度土壤中的有机质含量差异并不显著，因此本研究中土壤有机碳和全氮含量

空间变异较小，这与Zhang等^[11]在长白山的研究一致。

本研究中土壤全磷含量平均为 0.39 g kg^{-1} ，低于我国0~10 cm土壤全磷含量均值 0.78 g kg^{-1} ^[5]，其空间变异性低于土壤有机碳与全氮。这是因为磷主要来自岩石风化且迁移率低，属于沉积性元素。研究表明：高温多雨可加快岩石风化及磷的淋溶^[10]，本研究中低海拔梯度土壤温度高，加快土壤的风化，增加磷的累积，但同时降雨加速了淋溶过程，导致磷含量损失。此外本研究区域的土壤母质主要为坡积物与残积物，因此研究中土壤全磷的空间分布较为均匀，随海拔变化差异并不明显。

3.2 C、N、P化学计量特征的影响因素

土壤生态化学计量特征受研究区域水热条件及土壤母质的风化作用等自然环境的调控，不同海拔梯度下的森林类型表土土壤养分变化很大，使得土壤C、N、P比存在较大的空间变异。研究

表明：我国湿润温带土壤的C:N稳定在10~12之间，热带与亚热带土壤C:N高达20:1；根据土壤碳氮储量计算，全球土壤C:N平均为13.33^[20]，而全球森林0~10 cm土壤均值为12.4^[17]。本研究区域不同海拔梯度几种森林类型的土壤C:N介于9.80~15.49之间，均值为13.34，接近于全球土壤C:N，与前人研究结果一致。土壤C:P均值(102.2)高于全球森林0~10 cm土壤C:P均值(81.9)^[17]，较高的C:P是磷有效性低的一个指标，这从另一个方面验证了森林生态系统土壤磷的缺乏，这与赵维俊等^[19]研究结果一致，他还指出N:P高主要是研究区磷含量低决定的，在本研究区域也出现类似结果。

土壤C:N与有机质分解速度成反比关系^[21]，2 600~3 000 m海拔梯度的土壤C:N较低，表明该海拔梯度内有机质分解速度较快。Yang等^[22]也在研究中表明碳与氮的耦合并不取决于生态系统类型，研究中各海拔梯度土壤C:N差异也表现得并不显著，与张广帅等^[13]在云南小江流域不同海拔梯度土壤研究一致，他认为这可能是由于取样浅，未达矿物层造成的。这也同时验证了不同生态系统的土壤C:N相对稳定的结论。土壤C:P、N:P在2 200~2 300 m较高，这是因为该海拔梯度在野外调查中采样点坡度较平缓，植被种类丰富，草本植物生长较好；林地光照与通气状况良好，高大乔木造成的遮光现象不多；在凋落物与根系分解过程诱导形成的微生物区系丰富，导致该海拔梯度内土壤生物活性强，使得土壤碳、氮含量相对较高，以至于该海拔梯度内生态化学计量特征明显高于其他海拔梯度。

森林群落物种组成和结构的变化使凋落物的质量程度以及非生物的环境因子发生改变，不同森林类型植被下表土土壤生态化学计量特征具有一定差异。随海拔梯度增加，研究区域植被类型沿落叶阔叶林—针叶林—高山草甸顺序演替，土壤C、N、P含量及化学计量特征随之变化。当海拔梯度大于2 700 m，林带由阔叶林带转变为针叶林带，土壤C:N转变为上升趋势，土壤C:P、N:P减小，这是由于土壤温度降低，碳、氮累积速率减缓，同时针叶林带凋落物中单宁等酯溶性物质输入

土壤增多，碳累积速率慢于氮的累积。落叶松林带土壤C:N大于2个阔叶林带（桦木林带和辽东栎林带），两个针叶林带土壤C:P、N:P则小于阔叶林带，这与庞圣江等^[23]的研究结果一致。

冷杉林带生态化学计量比在几个森林生态系统中最小，这是因为长白山自冷杉林带的物种丰富度骤然下降，落叶松林带的种类丰富度稍高于冷杉林带^[24]。物种丰富度直接影响凋落量与凋落物，因此冷杉林带土壤养分含量低，致使其生态化学计量比也低于其他林带。

山地垂直带综合了温度、湿度和光照等不同环境因子的影响，海拔梯度上生物多样性变化，气候因子尤其显示出较强的相关性^[25]。研究结果显示气候因子对土壤C、N、P化学计量特征变异的影响各异，温度、含水量和海拔显著地影响了土壤C、N、P化学计量特征的变异，尤以温度影响最为显著。李红林等^[26]和肖焯等^[27]等均指出土壤含水量对土壤C、N、P化学计量特征起着最重要的作用，卢同平等^[28]提出温度也是制约N、P含量及N:P变异的重要因素，本研究结果进一步证实了这些结论。

本研究仅对不同海拔梯度的典型森林类型中表层土壤养分变化和化学计量特征进行了初步研究，对于全面评价秦岭森林生态系统土壤养分状况，还需要结合树种叶、树干和根系等器官以及枯落物中碳、氮和磷等的比例关系开展进一步研究，将不同尺度、不同生物群系和不同研究领域的生物地球化学循环研究有机地联系在一起，揭示森林植被—枯落物—土壤间的化学计量特征及其相互关系和空间变异。

4 结 论

研究区土壤有机碳、全氮含量整体较高，全磷含量整体较低。不同海拔梯度几种森林类型的土壤C:N接近于全球土壤C:N，土壤C:P与N:P均值高于全球森林0~10 cm土壤C:P与N:P均值。土壤温度和水分是影响土壤C、N、P生态化学计量比的主要因素，其次海拔也显著影响土壤C、N、P化学计量特征。

参考文献

- [1] Li A, Guo D L, Wang Z Q, et al. Nitrogen and phosphorus allocation in leaves, twigs, and fine roots across 49 temperate, subtropical and tropical tree species: A hierarchical pattern. *Functional Ecology*, 2010, 24 (1) : 224—232
- [2] Manzoni S, Trofymow J A, Jackson R B, et al. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecological Monographs*, 2010, 80 (1) : 89—106
- [3] Wang M, Moore T R. Carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry in an ombrotrophic peatland reflects plant functional type. *Ecosystems*, 2014, 17 (4) : 673—684
- [4] Ordoñez J C, Bodegom P M V, Witte J P M, et al. A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility. *Global Ecology & Biogeography*, 2009, 18 (2) : 137—149
- [5] 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. *Biogeochemistry*, 2010, 98 (3) : 139—151
- [6] Yuan Z Y, Chen H Y H. A global analysis of fine root production as affected by soil nitrogen and phosphorus. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, 279 (1743) : 3796—3802
- [7] 崔高阳, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征. *植物生态学报*, 2015, 39 (12) : 1146—1155
Cui G Y, Cao Y, Chen Y M. Characteristics of nitrogen and phosphorus stoichiometry across components of forest ecosystem in Shaanxi Province (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39 (12) : 1146—1155
- [8] 赵航, 贾彦龙, 王秋凤. 中国地带性森林和农田生态系统 C-N-P 化学计量统计特征. *第四纪研究*, 2014, 34 (4) : 803—814
Zhao H, Jia Y L, Wang Q F. Statistical characteristics of C-N-P stoichiometry in Chinese zonal forest and farmland ecosystems (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2014, 34 (4) : 803—814
- [9] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征. *自然资源学报*, 2015, 30 (5) : 870—879
Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 (5) : 870—879
- [10] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. *环境科学*, 2015, 36 (8) : 2988—2996
Li T, Deng Q, Yuan Z Y, et al. Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau (In Chinese). *Environmental Science*, 2015, 36 (8) : 2988—2996
- [11] Zhang M, Zhang X K, Liang W J, et al. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China. *Pedosphere*, 2011, 21 (5) : 615—620
- [12] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 等. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化. *生态学报*, 2015, 35 (18) : 6089—6099
Xiang H M, Wen D Z, Zhang L L, et al. Altitudinal changes in active and recalcitrant soil carbon pools of forests in the Dinghu Mountains (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (18) : 6089—6099
- [13] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例. *生态学报*, 2016, 36 (3) : 675—687
Zhang G S, Deng H J, Du K, et al. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: A case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (3) : 675—687
- [14] Nottingham A T, Turner B L, Whitaker J, et al. Soil microbial nutrient constraints along a tropical forest elevation gradient: A belowground test of a biogeochemical paradigm. *Supplement of Biogeosciences*, 2015, 12: 6071—6083
- [15] 唐志尧, 方精云, 张玲. 秦岭太白山木本植物物种多样性的梯度格局及环境解释. *生物多样性*, 2004, 12 (1) : 115—122
Tang Z Y, Fang J Y, Zhang L. Patterns of woody plant species diversity along environmental gradients on Mt. Taibai, Qinling Mountains (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2004, 12 (1) : 115—122
- [16] 魏新, 郑小锋, 张硕新. 秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究. *西北林学院学报*, 2014, 29 (3) : 9—14
Wei X, Zheng X F, Zhang S X. Forest soil physicochemical properties along different altitude gradients at Huoditang in the Qinling Mountains (In Chinese). *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29 (3) : 9—14
- [17] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry

- in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85 (3): 235—252
- [18] 张继平, 张林波, 王凤玉, 等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化. *土壤*, 2014, 46 (2): 262—268
Zhang J P, Zhang L B, Wang F Y, et al. Spatial variation of soil nutrient contents in the Jinggangshan National Nature Reserve (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (2): 262—268
- [19] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 477—489
Zhao W J, Liu X D, Jin M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* Forest in the Qilian Mountains (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 477—489
- [20] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage. *Nature*, 1985, 317 (6038): 613—616
- [21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28 (8): 3937—3947
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (8): 3937—3947
- [22] Yang Y H, Fang J Y, Guo C J, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: Nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. *Biogeosciences Discussion*, 2010, 7: 1—24
- [23] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 等. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征. *中国农学通报*, 2015, 31 (1): 17—23
Pang S J, Zhang P, Jia H Y, et al. Research on soil ecological stoichiometry under different forest types in northwest Guangxi (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31 (1): 17—23
- [24] 应俊生, 李云峰, 郭勤峰, 等. 秦岭太白山地区的植物区系和植被. *植物分类学报*, 1990, 28 (4): 261—293
Ying J S, Li Y F, Guo Q F, et al. Observations on the flora and vegetation of Taibaishan, Qinling mountain range, southern Shaanxi, China (In Chinese). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1990, 28 (4): 261—293
- [25] Storch D, Davies R G, Zajicek S, et al. Energy, range dynamics and global species richness patterns: reconciling mid-domain effects and environmental determinants of avian diversity. *Ecology Letters*, 2006, 9 (12): 1308—1320
- [26] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征. *土壤学报*, 2015, 52 (6): 1345—1355
Li H L, Gong L, Zhu M L, et al. Stoichiometric characteristics of soil in oasis on northern edge of Tarim Basin, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1345—1355
- [27] 肖焯, 黄志刚, 吴海涛, 等. 三江平原4种典型湿地土壤碳氮分布差异和微生物特征. *应用生态学报*, 2014, 25 (10): 2847—2854
Xiao Y, Huang Z G, Wu H T, et al. Carbon and nitrogen distributions and microbial characteristics in the soils of four types of wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (10): 2847—2854
- [28] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 等. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望. *土壤*, 2016, 48 (1): 29—35
Lu T P, Shi Z T, Niu J, et al. Research progresses and prospects of terrestrial ecological stoichiometry in China (In Chinese). *Soils*, 2016, 48 (1): 29—35

Carbon, Nitrogen and Phosphorus Contents in Soils on Taibai Mountain and Their Ecological Stoichiometry relative to Elevation

LI Danwei¹ WANG Ziquan¹ TIAN Haixia¹ HE Wenxiang^{1, 2†} GENG Zengchao¹

(1 College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 This study is to explore how soil carbon, nitrogen and phosphorus were distributed vertically along the slope of the Taibai Mountain and elaborate eco-stoichiometric characteristics

of these soil nutrient elements relative to elevation from 1 700 m to 3 500 m. 【Method】 Soil samples were collected along the slope at an interval of 100 m in elevation and soil physicochemical properties were mensurated for analysis. 【Result】 Results show as follows. (1) Soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the soil varied in the range of 23.56 ~ 83.59 g kg⁻¹, 2.00 ~ 5.77 g kg⁻¹ and 0.32 ~ 0.47 g kg⁻¹, respectively, and averaged 40.58 g kg⁻¹, 3.11 g kg⁻¹ and 0.39 g kg⁻¹, respectively. Soil organic carbon and TN displayed a trend of rising-first-and-declining-later with the rising elevation and a peak appeared at 3 000 m. The content of SOC was obviously higher in the middle section of the slope, 2 200 ~ 2 300 m in elevation than in the upper and lower sections of the slope and TN varied similarly in vertical distribution. So soil carbon and nitrogen content were quite consistent in spatial variation. However, TP varied much less spatially and along the altitude gradient. Along the slope of the Taibai Mountain, stand different types of forests in belt. In these different forest belts, regardless of type, the distributions of soil carbon, nitrogen, phosphorus were somewhat coupled. Soil C : N, C : P and N : P varied in the range of 7.17 ~ 18.41, 60.61 ~ 190.4 and 5.81 ~ 12.26, respectively, and averaged 12.99, 102.2 and 7.90. With rising elevation, soil C : N decreased in the broad-leaved forest belt and increased in the coniferous forest; soil C : N was quite close to the average (12.4) of the global forest soil (0 ~ 10 cm); soil C : P varied in a trend similar to what soil C : N did, and peaked in the section of the slope, 2 200 ~ 2 300 m in elevation, getting higher than the average (81.9) of the global forest soil (0 ~ 10 cm); and soil N : P was similar to soil C : N in variation. (2) SOC, TN and TP varied in the range of 23.84 ~ 49.54 g kg⁻¹, 2.42 ~ 3.62 g kg⁻¹ and 0.36 ~ 0.42 g kg⁻¹, and averaged 39.82 g kg⁻¹, 2.97 g kg⁻¹ and 0.39 g kg⁻¹, respectively, in the studied slope under whatever type of forest. SOC was obviously lower in the fir forest belt than in the broad-leaved forest (*Quercus acutidentata* forest, liaodong oak forest, birch forest) belt; soil TN in the coniferous forest belt was significantly lower than that in the *Quercus liaotungensis* forest and alpine meadow belts, and similar to those in the others; and soil TP differed slightly between forest belts. Soil C : N, C : P and N : P varied in the range of 9.80 ~ 15.49, 67.01 ~ 119.44 and 6.32 ~ 9.21, and averaged 13.36, 100.81 and 7.54, respectively. The two broad-leaved forests (*Quercus liaotungensis* forest belt and birch forest belt) and the alpine meadow belt were the highest in content of soil carbon and nitrogen and their ecological stoichiometric ratio, while the fir forest belt was the lowest. (3) Temperature, water content, elevation and vegetation may quite well explain the variation of the ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus. Redundancy analysis shows that the points of I and I on the sequencing axis may explain 57.94% and 9.21% of the variation of the contents of soil nutrients and their stoichiometric characteristics, and the four factors, temperature, water content, elevation and vegetation, may explain 25.7%, 22.5%, 20.9% and 18.7%, respectively, of the system variation. Obviously, elevation is the major factor that directly determines vegetation type and environmental conditions, which in turn affect distribution and eco-stoichiometry of soil nutrients. 【Conclusion】 All the findings in this study may serve as scientific basis for determining soil nutrient supply and its limiting factors in these forest soils and evaluating quality of these soils. However, more effects should be made to further discuss the issue of soil nutrients and their eco-stoichiometric characteristics, and to expose stoichiometric characteristics, mutual relationships and spatial variation of the forest system of vegetation-litter-soil.

Key words Elevation (Altitude above sea level) ; Taibai Mountain; Soil nutrient; Stoichiometric characteristic; Vegetation type

(责任编辑: 陈荣府)