

引用格式: 黄得志, 盛浩, 尹泽润, 薛毅, 田宇. 底土碳氮磷比值及其环境因子沿海拔变化——以湘东大围山为例[J]. 山地学报, 2021, 39(5): 621-630.

HUANG Dezhi, SHENG Hao, YIN Zerun, XUE Yi, TIAN Yu. Soil C, N, and P ratios and their environmental controls along elevation gradients of subsoil: a case study of Mt. Daweishan of eastern Hunan province, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(5): 621-630.

底土碳氮磷比值及其环境因子沿海拔变化 ——以湘东大围山为例

黄得志, 盛浩*, 尹泽润, 薛毅, 田宇

(湖南农业大学 资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 深入理解山地表土和底土有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其元素化学计量比与环境因子沿海拔带的关系,可揭示山地土壤养分产生空间变异的限制因子。目前,研究的对象多为表土和整个土壤剖面,对于底土的相关研究较少,且没有综合考虑海拔、植被、坡度和坡向对碳氮磷比值的影响。本研究选取湘东典型花岗岩大围山为研究对象,野外沿垂直带设置20个调查样地,结合实验分析土壤SOC、TN和TP含量,探索土壤C、N、P化学计量比值与环境因子的关系。结果表明:(1)土壤剖面上SOC、TN和TP含量均与海拔呈显著正相关,且土壤SOC、TN和TP含量两两均呈显著正相关,揭示了土壤C、N、P元素存在耦合关系。(2)表土C:N、C:P和N:P分别为12.3~97.8、30.6~367.3和0.5~16.9,表土C:N:P平均值72:3.8:1,明显高于底土平均值(18:1.4:1)。(3)环境因子中的地形(海拔、坡向)和土壤理化性质(阳离子交换量和土壤质地)是影响垂直带土壤C、N、P化学计量比的主要因子。本研究有助于认识土壤元素生物地球化学循环特征,并为科学保育山地土壤生态系统提供参考。

关键词: 土壤养分; 底土; 化学计量比; 环境因子; 大围山

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

在全球、区域和流域尺度上,土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)元素循环具有紧密的耦合关系,甚至可能存在一个类似的、较稳定的C、N、P比值(即Redfield值)^[1-3]。据统计^[1,4],全球0~10 cm表层土壤C:N:P均值为186:13:1,中国2384个土壤剖面(剖面深度为0~250 cm)C:N:P均值为60:5:1。中国南方1069个水田和旱地0~20 cm表层土壤C:N:P均值为80:7.9:1^[2]。山地土壤是否也存在较稳定的C、N、P比值?与全国乃至全球的比值相比有何差异?土壤C、N、P含量和比值在山地垂直

带上的空间分布和演变趋势如何?具有哪些限制因子?这些问题有待深入研究。

山地土壤C、N、P含量和比值与海拔的关系最为密切,但这种关系在不同区域仍存在较大差异。例如,华南猫儿山的土壤SOC含量、TN含量、C:P和N:P随海拔升高均呈增加的趋势,C:N先增加后保持稳定,TP含量先增后减;随土壤剖面深度的增加,C:N、C:P和N:P具有不同程度的变异^[5]。半干旱地区马衔山的土壤SOC含量、TN含量及C:P和N:P随海拔升高而增大,但C:N随海拔升高先增

收稿日期(Received date):2020-12-21;改回日期(Accepted date):2021-07-15

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(41571234);湖南省教育厅优秀青年项目(15B110)[National Natural Science Foundation of China General Program(41571234);Outstanding Youth Project of Education Department of Hunan Province(15B110)]

作者简介(Biography):黄得志(1994-),男,广西德保人,硕士研究生,主要研究方向:土壤肥力质量演变与调控。[HUANG Dezhi(1994-), male, born in Debao, Guangxi province, M. Sc. candidate, research on evolution and regulation of soil fertility quality] E-mail: walker.h@stu.hunau.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author):盛浩(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向:土壤资源利用。[SHENG Hao(1982-), male, Ph. D., associate professor, specialized in utilization of soil resources] E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn

加后降低,TP 含量的空间变异较小^[6]。热带安第斯山脉的土壤 C:N、C:P 和 N:P 均随海拔升高而增加,而且土壤 C、N、P 比值具有更高的空间变异性^[7]。目前,研究的对象多为表土和整个土壤剖面,对于底土的相关研究较少。且已有研究主要关注海拔和植被对碳氮磷比值的控制作用,缺乏其他环境因子(如坡度和坡向)对碳氮磷比值影响的探讨。在山地景观上,不同坡度土壤的搬运功能存在差异,从而影响土层发育;不同坡向土壤所受的温度、湿度存在差异,从而影响土壤微生物活动性^[8-9]。在山地资源开发日趋广泛的今天,表土流失严重,底土则被视为土壤养分的储备场所。深入研究山地垂直带土壤 C、N、P 元素比值与环境因子关系,对了解山地土壤 C、N、P 生物地球化学循环特征和科学保育山地土壤都具有重要意义。

中亚热带典型花岗岩大围山,发育的土壤抗蚀能力弱,人为干扰后极易发生水土流失^[10]。随着近几年森林游憩的兴起,对山地资源开发力度越来越大,土壤养分受到的威胁日益加剧。本研究选取湘东大围山垂直带 20 个样地为研究对象,对土壤剖面分层取样,记录样地环境因子。分析表土和底土 C、N、P 含量及其比值与环境因子之间的关系。旨在阐明土壤 C、N、P 含量及其比值在大围山垂直带和土壤剖面上的空间分布规律,揭示典型花岗岩中山土壤 C、N、P 比值的限制因子,以期了解山地土壤养分的空间变异、限制因子和资源合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省东部,大围山国家级森林公园(114°02'~114°12'E、28°21'~28°26'N),地处幕阜—罗霄山脉分支的大围山支脉,相对高差 1429 m。当地属典型的中亚热带山地暖湿季风气候,年平均气温 11℃~16℃,年降水量 1200~2200 mm^[11]。中山植被带整体保存和保护较好,但中、低海拔带(海拔<500 m)原生植被破坏严重,仅残存马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、毛竹(*Phyllostachy sheterocycla*)林和次生灌丛(表 1)。在 500~1200 m 海拔带,多分布毛竹、樱桃(*Cerasuspseudocerasus*)、锥栗(*Castanea-*

henryi), 1200~1400 m 山体中上部多为黄山松(*Pinustaiwanensis*)天然林,山顶(海拔>1400 m)分布杜鹃(*Rhododendron simsii*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)灌草群落^[12-13]。母岩主要由湖南省最古老的中元古代(约 8 亿年前)雪峰晚期中粒堇青石二云母花岗闪长岩(长三背)、少量的二长花岗岩、二云母花岗岩及较少见的黑云母斜长花岗岩组成,风化程度高^[14]。按中国土壤系统分类的标准,土纲类型主要有雏形土、淋溶土、新成土、富铁土和潜育土^[11]。土体发育深厚,一般>1 m。土壤质地砂性重,钾素丰富,磷素匮乏^[15]。

1.2 野外样点设计与样品采集

基于遥感影像解译,考虑研究区内成土母质类型、海拔、植被、地貌、土地利用方式和流域因素,规划采样路线,在不同山坡上随机设置 20 个调查样地。实地选取典型土壤剖面挖掘点,尽量避开人为干扰的位置。

按照《野外土壤描述与采样规范》标准,在调查样地内挖掘新鲜的土壤剖面(宽约 1.2 m,深约 1.2~2 m) 1~2 个,记录调查样地位置和成土环境,划分土壤发生层。采集土壤发生层样品共 84 个,带回室内经风干、过筛后,测定土壤理化性质;野外同时用体积 100 cm³ 的环刀采集各发生层的原状土壤,带回室内烘干,测定土壤容重^[16]。

1.3 土壤指标测定与数据处理

按照《土壤调查实验室分析方法》测定土壤 SOC、TN、TP、pH、阳离子交换量(CEC)、容重、颗粒组成、盐基饱和度^[16]。为建立环境数据矩阵,坡度和坡向以等级制表示:按平地、微坡、缓坡、中缓坡、中坡、陡坡和极陡坡,将坡度分为 7 个等级,数值越高坡度越陡;按照 45°的夹角,以正北方向为 0°,分为 8 个等级:1 表示北坡(0°~22.5°,337.5°~360°),2 表示东北坡(22.5°~67.5°),3 表示西北坡(292.5°~337.5°),4 表示东坡(67.5°~112.5°),5 表示西坡(247.5°~292.5°),6 表示东南坡(112.5°~157.5°),7 表示西南坡(202.5°~247.5°),8 表示南坡(157.5°~202.5°),数字越大,指示坡向越向阳^[16,18]。

土壤 C、N、P 比值的计算:将土壤 SOC、TN 和 TP 含量转化为摩尔含量,再计算土壤剖面 C:N、C:P 和 N:P 的摩尔比^[4,19]。以 C:N 为例,计算公式如下:

表 1 土壤采样地概况

Tab. 1 Basic information of soil sampling sites

样地编号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	土壤亚类	植被类型	优势植物种
43-LY03	179	极陡坡	西	普通筒育湿润富铁土	常绿阔叶林	香樟
43-LY21	650	极陡坡	南	黄色铝质湿润锥形土	常绿阔叶林	杉木
43-LY18	736	缓坡	北	普通湿润正常新成土	常绿阔叶林	马尾松
43-LY19	743	中缓坡	东北	红色铁质湿润锥形土	常绿阔叶林	杨梅
43-LY14	911	极陡坡	西南	普通铝质常湿锥形土	常绿阔叶林	毛竹
43-LY13	1032	极陡坡	南	普通铝质常湿淋溶土	常绿阔叶林	油茶
43-LY11	1102	陡坡	西南	普通铝质常湿锥形土	常绿落叶阔叶混交林	毛竹
43-LY10	1198	中坡	北	腐殖铝质常湿淋溶土	常绿落叶阔叶混交林	樱花
43-LY12	1199	陡坡	东北	普通湿润正常新成土	常绿落叶阔叶混交林	香樟
43-LY17	1379	极陡坡	西北	腐殖铝质常湿淋溶土	山顶矮林	白檀
43-LY09	1414	中缓坡	北	腐殖筒育常湿锥形土	山顶矮林	海棠
43-LY24	1482	微坡	东北	普通筒育滞水潜育土	灌丛草	五节芒
43-LY06	1488	缓坡	西	腐殖铝质常湿锥形土	灌丛草	杜鹃
43-LY16	1489	中坡	西南	普通铝质常湿淋溶土	山顶矮林	黄山松
43-LY08	1498	缓坡	南	腐殖铝质常湿锥形土	山顶矮林	红果山胡椒
43-LY05	1550	极陡坡	西北	腐殖铝质常湿淋溶土	灌丛草	杜鹃
43-LY23	1560	陡坡	西南	普通湿润正常新成土	山顶矮林	红叶木姜子
43-LY22	1564	中缓坡	西北	腐殖酸性常湿锥形土	灌丛草	白茅
43-LY07	1573	微坡	西	石质湿润正常新成土	灌丛草	杜鹃
43-LY15	1573	陡坡	西南	腐殖铝质常湿锥形土	灌丛草	杜鹃

注:坡度的划分标准是≤2°为平地、2°~5°为微坡、5°~8°为缓坡、5°~15°为中缓坡、15°~25°为中坡、25°~35°为陡坡、>35°为极陡坡。

$$C:N = \frac{\sum C_i \times B_i \times d_i \times V_i}{\sum N_i \times B_i \times d_i \times V_i} \quad (1)$$

式中, i 为各层土壤; C_i 为第*i*层 SOC(TN 或 TP)含量($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$); N_i 为第*i*层 TN 含量($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为第*i*层的土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); d_i 为第*i*层发生层厚度(cm); V_i 为第*i*层石砾体积含量(%)。

基于 Excel 2010 软件平台,计算土壤 SOC、TN 和 TP 含量和 C:N、C:P 和 N:P 摩尔比的均值、极值、标准差和变异系数。基于土壤剖面各发生层深度的加权平均值,计算表土(A 层)、底土(A 层下届至 100 cm 处)和土壤剖面计量比。基于 SPSS 22.0 软件平台,应用单因素方差分析,比较不同海拔和发生层的土壤 SOC、TN、TP 含量和 C:N、C:P、N:P 的均值差异。应用线性回归分析,分析土壤 C、N、P 含量与其生态化学计量比的关系。应用 Pearson 相关

分析,研究土壤 C、N、P 的生态化学计量特征与环境因子的相关性。显著性检验均采用最小极差法(LSD)。基于 CANOCO 5.0 软件平台,针对土壤 C、N、P 生态化学计量特征和环境因子的趋势分析(DCA)表明,土壤 C、N、P 含量及其计量比的排序轴长度(LGA)最大为 0.68(<3),适合线性排序法,可应用冗余分析(RDA)进一步研究土壤 C、N、P 生态化学计量特征的综合影响因子^[20]。综合运用 Origin 2018 和 Excel 2010 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 土壤 SOC、TN、TP 含量

土层显著影响大围山土壤 SOC、TN 含量,表土 SOC 和 TN 平均含量分别高出底土 SOC 和 TN 平均含量约 2 倍和 3.3 倍(表 2)。但是,土层对土壤 TP

含量的影响较小,从表土到底土,土壤 TP 含量仅降低 10%,这可能与花岗岩山地土壤砂性重、P 素水平低且容易流失有关。从偏度和峰度看,土壤 SOC、TN 和 TP 含量呈右偏且缓峰的矮胖分布(偏度 > 0、峰度 < 3)。变异系数为 0.3 ~ 1.0,属中度程度空间

变异。
海拔也显著影响大围山土壤 SOC、TN 和 TP 含量。回归分析表明,表土、底土和土壤剖面 SOC、TN 和 TP 含量均与海拔呈显著或极显著正相关关系(图 1)。

表 2 土壤 SOC、TN 和 TP 含量的描述性统计

Tab. 2 Descriptive statistics of soil C, N, and P content (单位:g·kg⁻¹)

土层	指标	平均值	标准差	最小值	最大值	偏度	峰度	变异系数
表土	SOC	40.45	25.98	9.79	105.81	0.97	0.35	0.64
	TN	2.16	1.50	0.26	6.04	0.86	0.51	0.69
	TP	0.57	0.28	0.20	1.20	0.79	-0.39	0.50
底土	SOC	9.20	4.90	2.97	22.22	1.31	1.33	0.53
	TN	0.75	0.42	0.14	1.70	0.76	-0.17	0.56
	TP	0.52	0.20	0.20	0.95	0.27	-0.62	0.38
土壤剖面	SOC	14.15	6.98	4.90	28.63	0.57	-0.94	0.49
	TN	1.22	1.17	0.21	5.90	0.30	-0.85	0.96
	TP	0.51	0.20	0.20	0.93	0.24	-0.88	0.40

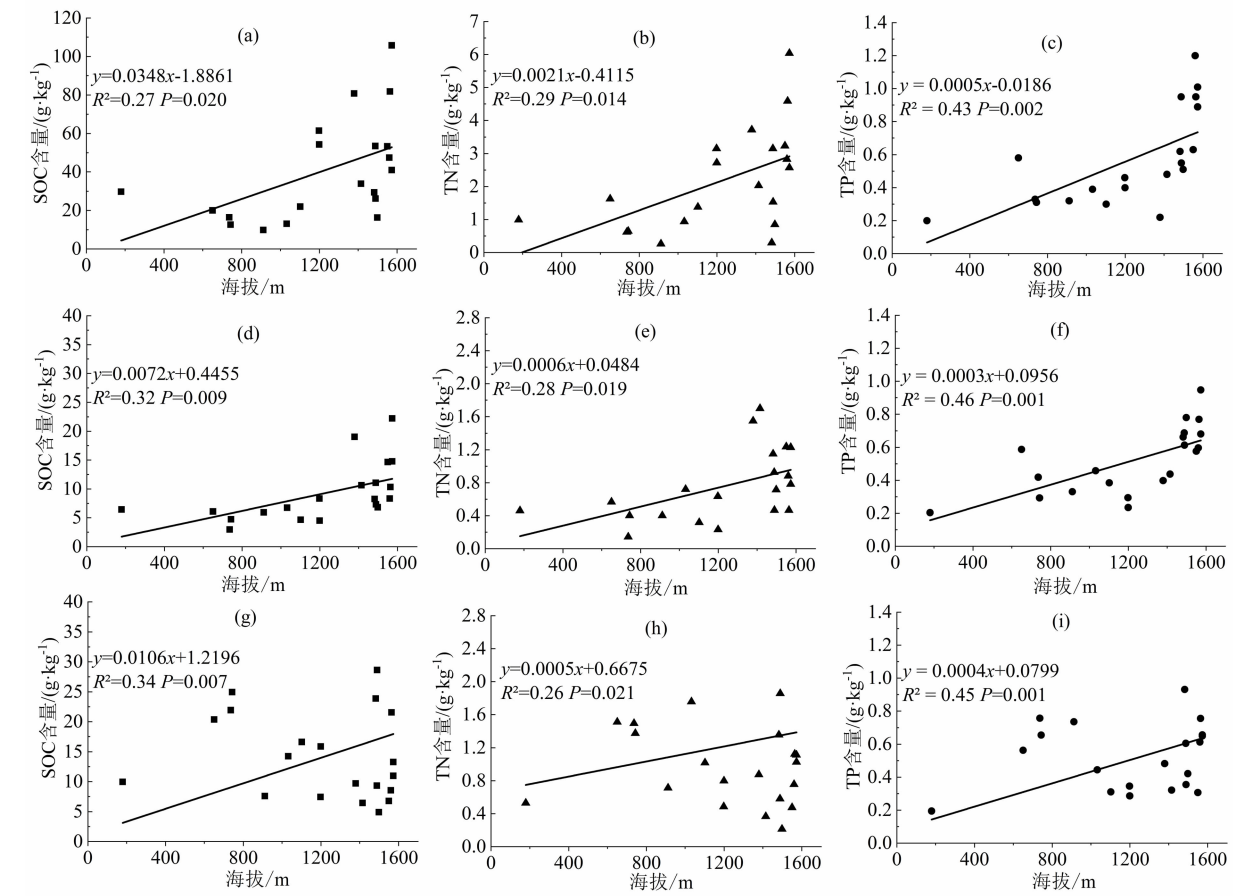


图 1 不同土层土壤 SOC、TN 和 TP 含量与海拔的关系:(a) - (c) 表土;(d) - (f) 底土;(g) - (i) 土壤剖面

Fig. 1 Relationships between soil SOC, TN, TP contents and elevation: (a) - (c) topsoil, (d) - (f) subsoil, (g) - (i) soil profile

回归分析表明,土壤 SOC 和 TN 含量 ($R^2 = 0.92, P < 0.01$)、土壤 SOC 和 TP 含量 ($R^2 = 0.19, P = 0.050$)、土壤 TN 和 TP 含量 ($R^2 = 0.29, P = 0.014$)均呈显著或极显著正相关关系(图 2)。

2.2 土壤 C、N、P 的比值

表土 C:N、C:P 和 N:P 分别为12.3 ~ 97.8(均值 23.5)、30.6 ~ 367.3(均值 83.6)和 0.5 ~ 16.9(均值 4.2),C:N:P 平均值为72:3.8:1(表 3)。与表土相比,底土 C:N、C:P 和 N:P 更低,分别为 6.3 ~ 22.1、7.1 ~ 47.7 和 0.4 ~ 3.9,C:N:P 平均值为18:1.4:1,但与土壤剖面 C:N、C:P 和 N:P 的加权平均值类似。从偏度和峰度看,土壤 C:N、C:P 和 N:P 数据分布呈右偏且陡峭的瘦尾分布(偏度 > 0、峰度 < 8),底土 C:N 数据分布则显得相对较为平缓。变异系数为 0.2 ~ 0.9,属中度程度变异。

2.3 土壤 C、N、P 比值与环境因子的关系

冗余分析表明,表土和底土 C、N、P 生态化学计量特征在前 2 个排序轴解释系统变异信息的累积解释量分别达到 81% 和 74%,生态化学计量比—环境因子关系累积解释量均达到 100%(表 4)。显然,前 2 个排序轴成分对表土和底土 C、N、P 生态化学计量特征起着主要控制作用。

表土、底土的 C、N、P 含量及其化学计量比与土壤—环境因子的关系基本类似(图 3)。土壤 C、N、P 含量、C:P 和 N:P 分别与海拔、坡度、土壤 CEC 和粉粒呈正相关,与坡向、土壤砂粒、黏粒、pH、容重和盐基饱和度呈负相关;土壤 C:N 的相关性则相反,分别与海拔、坡度、土壤 CEC 和粉粒呈负相关,与坡向、土壤砂粒、黏粒、pH、容重和盐基饱和度呈正相关。

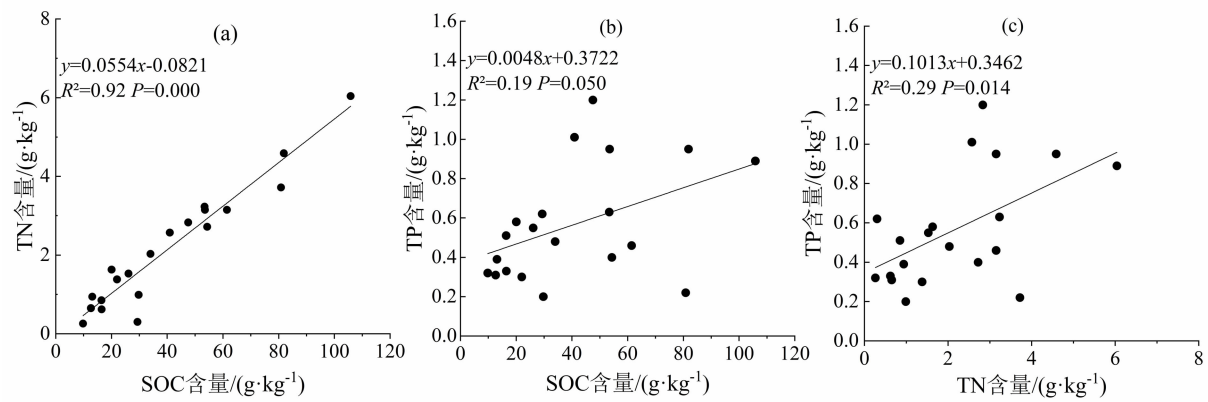


图 2 表土 SOC、TN 和 TP 含量的关系:(a) SOC 和 TN;(b) SOC 和 TP;(c) TN 和 TP

Fig. 2 Relationships among the contents of SOC, TN, and TP in topsoil: (a) SOC and TN, (b) SOC and T, (c) TN and TP

表 3 土壤 C:N、C:P 和 N:P 的描述性统计

Tab. 3 Descriptive statistics of C:N, C:P, and N:P in soils

土层	比值	平均值	标准差	最小值	最大值	偏度	峰度	变异系数
表土	C:N	23.47	17.98	12.30	97.82	3.81	15.58	0.77
	C:P	83.58	74.82	30.59	367.32	2.90	10.10	0.90
	N:P	4.21	3.46	0.48	16.91	2.54	8.54	0.82
底土	C:N	13.58	4.34	6.26	22.14	0.34	-0.65	0.32
	C:P	18.85	9.27	7.11	47.72	1.60	3.31	0.49
	N:P	1.55	0.93	0.35	3.89	1.52	2.20	0.60
土壤剖面	C:N	15.17	3.68	8.11	22.93	0.10	-0.50	0.24
	C:P	30.11	17.49	10.31	80.56	1.41	1.92	0.58
	N:P	2.03	1.11	0.51	5.23	1.40	2.14	0.55

表 4 化学计量特征与土壤-环境因子的冗余分析 (RDA) 排序

Tab.4 Stoichiometric characteristics and RDA sequencing of soil - environmental factors

土层	排序轴	特征值	化学计量比			所有排序轴显著性检验
			环境因子相关系数	累积解释量/%	环境因子关系 累积解释量/%	
表土	第 1 轴	0.6461	0.9484	65	80	$F = 4.2, P = 0.002$
	第 2 轴	0.1031	0.8445	75	93	
	第 3 轴	0.0559	0.6447	81	100	
	第 4 轴	0.0005	0.8578	81	100	
底土	第 1 轴	0.4729	0.8656	47	64	$F = 3.1, P = 0.002$
	第 2 轴	0.1454	0.9375	62	84	
	第 3 轴	0.1155	0.7633	73	100	
	第 4 轴	0.0024	0.7607	74	100	

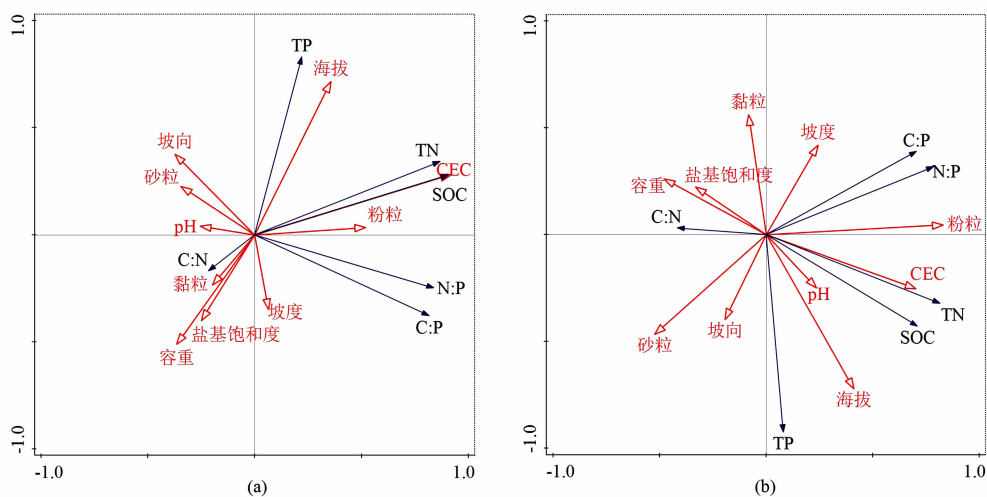


图 3 土壤-环境因子与 C、N、P 含量及其化学计量比的 RDA 分析二维排序图:(a)表土;(b)底土

Fig.3 RDA analysis of soil - environment factors , C , N , P contents and their stoichiometric ratios: (a) topsoil; (b) subsoil

环境因子强烈地影响表土和底土 C、N、P 化学计量特征,贡献率大小顺序分别为 CEC、坡向、粉粒、海拔、粉粒、CEC、砂粒、海拔(表 5),这表明地形(海拔与坡向)、土壤 CEC 和质地是调控湘东大围山花岗岩中山土壤 C、N、P 化学计量特征的关键环境因子。

3 讨论

3.1 湘东大围山土壤 C、N、P 比值

大围山花岗岩山地表土 C:N 的平均值为 23.5,高于全球和中国的表土 C:N 平均值(分别为 14.3

表 5 土壤-环境因子解释量及显著性检验

Tab.5 Interpretation of soil environmental factors and significance test				
土层	因子	因子解释量	<i>F</i>	<i>P</i>
表土	CEC	55.60	22.60	0.002
	坡向	25.60	5.80	0.012
	粉粒	19.30	4.30	0.026
	海拔	14.50	3.10	0.050
底土	粉粒	32.80	8.80	0.004
	CEC	26.00	6.30	0.010
	砂粒	17.00	3.70	0.022
	海拔	15.80	3.40	0.030

和 14.4)^[1,4]。由于大围山气候温凉,地处偏远,人为干扰也相对较少,植被覆盖度高,生物量较大,这种生物地理环境有利于土壤 SOC 积累。本课题组前期报道,在大围山土壤诊断特性中,土壤剖面上常分布暗色的腐殖质表层;例如,在 26 个典型土系调查样区中,有 9 个土系具有腐殖质特性^[14]。此外,大围山林地表土 SOC 水平也较高, SOC 平均含量达 $40.45 \pm 25.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。这也是大围山表土 C:N 平均值高于全球、中国的表土 C:N 平均值的可能原因之一。

虽然大围山表土 C:N 高于全球、中国的表土 C:N,但表土 C:P(84)和 N:P(4.2)却低于全球、中国表土的 C:P 和 N:P(186 和 13.1、136 和 9.3)^[1,4]。这反映花岗岩山地土壤中可能存在一定的 P 素限制作用。统计分析显示,大围山表土 SOC、TN 和 TP 含量两两之间存在显著相关性(图 2),也暗示山地自然土壤中 C、N、P 存在耦合关系。据报道,旱地表土 SOC、TN 和 TP 含量两两之间中也往往存在显著相关性^[21]。这与人为干扰强烈、由长期水耕熟化作用形成的水耕人为土 C、N、P 含量两两之间的关系不同^[20]。由于山地土壤以自然土壤、旱地土壤为主,外部肥料和养分的人为投入少,土壤 P 素的限制作用可能较强。

随着土壤剖面的加深,植被和气候(如水、热和光照)对土壤发育的影响逐渐减弱。在中国亚热带地区,林地表土 C:N、C:P 和 N:P 平均值高于底土 C:N、C:P 和 N:P 平均值^[3,21],但在不同区域又有所差异。例如,在广西猫儿山,随着土壤剖面加深,土壤 C:N 几乎无明显变化,变异系数仅为 4%,但土壤 C:P 和 N:P 均呈降低趋势,变异系数分别高达 63% 和 59%^[5]。在青藏高原东部亚高山森林带,随着土壤剖面加深,土壤 C:N、C:P 和 N:P 均按幂函数式呈降低趋势^[22]。本研究中,随着剖面发生层的加深,土壤 C、N、P 比值也呈降低趋势。表土 C:N 比底土 C:N 高出 73%,而表土 C:P 和 N:P 分别比底土 C:P 和 N:P 高出 4.4 倍和 2.6 倍。可能的原因之一是,大围山土壤 SOC、TN 水平较高,而 TP 含量相对较低(表 3)。在区域尺度上,土壤氮素有效性在时间上是相对稳定的^[23],然而,亚热带地区较高强度的氮沉降速率可能促进土壤 SOC 积累,同时降低 TP 含量,可能提高表土中 C:N,降低深层底土中 C:N^[3]。

3.2 土壤 C、N、P 比值与环境因子的关系

山地凸起于平地之上,在较小空间范围内,水热、植被和土壤物质的变化相对于平地更为剧烈。地形(海拔、坡度和坡向)通过调控环境因子,间接控制山地表土和底土的 C、N、P 比值。首先,坡向显著影响中、高山地的水热环境,改变土壤养分的分布^[8,18]。其次,随着海拔升高,植被类型从常绿阔叶林转变为落叶阔叶林、灌丛和草甸,植物凋落物和地下根系周转带来的土壤有机碳、氮和磷的输入产生明显差异。最后,海拔控制温度、湿度和光照因子,引起土壤微生物群落多样性的变化和土壤 C、N、P 积累和分解能力的差异^[24]。

土壤关键理化性质也是调控土壤元素化学计量比的重要因素。土壤 CEC 是反映土壤保肥与供肥能力的一个关键的综合指标,它是大围山表土 C、N、P 化学计量比的解释能力最强的环境因子(图 3,表 5),反映土壤元素化学计量比值与土壤保肥与供肥的综合能力之间存在密切关系。土壤质地也是决定土壤肥力的关键物理性质之一。据报道,在青藏高原的高山草甸,高山草原和高山沙漠的 0~10 cm 表土中,粉粒和黏粒对土壤 C、N、P 化学计量比的总解释量达 33%^[25]。在江西红壤小流域,旱地和水田土壤 C:N:P 与土壤黏粒含量呈负相关^[26]。然而,在广西猫儿山,土壤砂粒、粉粒和黏粒均对土壤 C、N、P 化学计量比无显著影响^[5]。大围山土壤起源于花岗岩风化物,砂粒和粉粒含量相对较高,土壤质地以壤土类为主^[14]。在大围山,土壤粉粒显著影响表土 C、N、P 化学计量比,土壤粉粒和砂粒则显著影响底土 C、N、P 化学计量比(表 5)。通常,土壤粉粒含易风化矿物,比砂粒更易风化和释放养分^[27]。此外,含粉粒较多的土壤具有一定的黏结性和可塑性,也具有较好的养分保存和供应能力。特别是在大围山花岗岩风化物发育的底土中,砂粒含量很高($529 \pm 129 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),而粉粒含量在底土有机碳和氮、磷养分保存中可能起着关键作用。

4 结论

本文通过对湘东大围山的土壤 SOC、TN、TP 含量及其化学计量比与土壤-环境因子的关系,得出以下结论:

(1)随着海拔升高,大围山的土壤剖面上 SOC、

TN 和 TP 含量均呈升高趋势,土壤 SOC、TN 和 TP 含量两两均呈显著正相关关系,反映土壤 C、N、P 元素存在耦合关系。

(2)大围山土壤的碳贮存量较高,表土 C:N 明显高于世界和中国土壤 C:N 的平均水平,但土壤的磷贮存量较低,表土的 C:P 和 N:P 也明显低于世界和中国土壤 C:P 和 N:P 的平均水平;在土壤剖面上,表土 C:N:P 平均值明显高于底土 C:N:P 平均值。

(3)大围山土壤 C、N、P 化学计量比与生态、环境因子的关系密切;其中,地形(海拔、坡向)和土壤理化性质(CEC 和土壤质地)是大围山土壤 C、N、P 化学计量比的主要调控因子;在土壤剖面上,随着土壤发生层的加深,地形对土壤 C、N、P 化学计量比的影响明显减小。中亚热带花岗岩风化物发育的山地土壤,抗蚀性差,生态脆弱,山地开发利用中应特别注重保护,防止土壤养分流失,维持土壤生态系统的养分动态平衡与稳定。

参考文献 (References)

- [1] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85** (3): 235 - 252. DOI: 10.1007/s10533-007-9132-0
- [2] LI Yong, WU Jinshui, LIU Shoulong, et al. Is the C:N:P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26** (4): GB4002. DOI: 10.1029/2012GB004399
- [3] YU Zaipeng, WANG Minhuang, HUANG Zhiqun, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24** (3): 1308 - 1320. DOI: 10.1111/gcb.13939
- [4] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, ZHANG Chi, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98** (1-3): 139 - 151. DOI: 10.1007/s10533-009-9382-0
- [5] 秦海龙,付旋旋,卢瑛,等. 广西猫儿山不同海拔土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2019, **30** (3): 711 - 717. [QIN Hailong, FU Xuanxuan, LU Ying, et al. Soil C:N:P stoichiometry at different altitudes in Mao'er Mountain, Guangxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30** (3): 711 - 717] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201903.027
- [6] 李新星,刘桂民,吴小丽,等. 马衡山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2020, **39** (3): 758 - 765. [LI Xinling, LIU Guimin, WU Xiaoli, et al. Elevational distribution of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus contents and their ecological stoichiometry on Maxian Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39** (3): 758 - 765] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202003.004
- [7] 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 [J]. *Biogeosciences*, 2015 (12): 6071 - 6083. DOI: 10.5194/bg-12-6071-2015
- [8] BRUELHERIDE H, DENGLER J, PURSCHKE O, et al. Global trait - environment relationships of plant communities [J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2018, **2** (12): 1906 - 1917. DOI: 10.1038/s41559-018-0699-8
- [9] XU Zhonglin, CHANG Yapeng, LI Lu, et al. Climatic and topographic variables control soil nitrogen, phosphorus, and nitrogen: Phosphorus ratios in a *Picea schrenkiana* forest of the Tianshan Mountains [J]. *PLoS ONE*, 2018, **13** (11): e0204130. DOI: 10.1371/journal.pone.0204130
- [10] 罗兰花,王翠红,谢红霞,等. 大围山花岗岩风化物发育土壤抗蚀性垂直分异[J]. *水土保持研究*, 2018, **25** (1): 62 - 65 + 71. [LUO Lanhua, WANG Cuihong, XIE Hongxia, et al. Study on vertical differentiation of anti-erodability of soil developed from granite weathering in Dawei mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25** (1): 62 - 65 + 71] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.01.011
- [11] 罗卓,欧阳宁相,张杨珠,等. 大围山花岗岩母质发育土壤在中国土壤系统分类中的归属[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2018, **44** (3): 301 - 308. [LUO Zhuo, OUYANG Ningxiang, ZHANG Yangzhu, et al. Attribution of the soils developed from the weathered granites in Dawei mountain area in Chinese soil taxonomy [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2018, **44** (3): 301 - 308] DOI: 10.13331/j.cnki.jhau.2018.03.013
- [12] 马欣,盛浩,魏亮,等. 湘东大围山不同海拔带土壤溶解性有机碳含量[J]. *生态学杂志*, 2016, **35** (3): 641 - 646. [MA Xin, SHENG Hao, WEI Liang, et al. Content of soil dissolved organic C along an altitude gradient in Daweishan mountain of eastern Hunan province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35** (3): 641 - 646] DOI: 10.13292/j.1000-4890.201603.012
- [13] 马颖榴,宋佳龄,潘博,等. 湘东大围山土壤垂直带谱微生物群落特征[J]. *生态环境学报*, 2017, **26** (12): 2045 - 2051. [MA Haoliu, SONG Jialing, PAN Bo, et al. Characteristics of soil microbial community along an elevation transect in Daweishan mountain of east Hunan province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26** (12): 2045 - 2051] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.12.007
- [14] 盛浩. 亚热带典型山地土壤发生、分类与利用[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 30 - 33, 74, 142. [SHENG Hao. Soil genesis, classification and utilization of typical subtropical mountains [M].

- Beijing: Science Press, 2020: 30–33, 74, 142]
- [15] 潘博, 段良霞, 张凤, 等. 红壤剖面土壤养分对土地利用变化响应的敏感性[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(9): 2707–2716. [PAN Bo, DUAN Liangxia, ZHANG Feng, et al. Responsive sensitivity of nutrients in red soil profile to land use change [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(9): 2707–2716] DOI: 10.13292/j.1000-4890.201809.028
- [16] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 6–43. [ZHANG Ganlin, LI Decheng. Manual of soil description and sampling [M]. Beijing: Science Press, 2016: 6–43]
- [17] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1–100. [ZHANG Ganlin, GONG Zitong. Soil survey laboratory methods [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1–100]
- [18] 邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等. 北京山区防护林优势树种分布与环境的关 系[J]. 生态学报, 2012, **32**(19): 6092–6099. [SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al. Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(19): 6092–6099] DOI: 10.5846/stxb201108231229
- [19] 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[J]. 第四纪研究, 2014, **34**(4): 803–814. [ZHAO Hang, JIA Yanlong, WANG Qiufeng. Statistical characteristics of C–N–P stoichiometry in Chinese zonal forest and farmland ecosystems [J]. Quaternary Sciences, 2014, **34**(4): 803–814] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7410.2014.04.13
- [20] 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 等. 亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 403–411. [SONG Jialing, SHENG Hao, ZHOU Ping, et al. Ecological stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in subtropical paddy soils [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 403–411] DOI: 10.13227/j.hjxx.201906169
- [21] QIAO Yang, WANG Jing, LIU Heming, et al. Depth–dependent soil C–N–P stoichiometry in a mature subtropical broadleaf forest [J]. Geoderma, 2020, **370**: 114357. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114357
- [22] FENG Defeng, BAO Weikai, PANG Xueying. Consistent profile pattern and spatial variation of soil C/N/P stoichiometric ratios in the subalpine forests [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, **17**(8): 2054–2065. DOI: 10.1007/s11368-017-1665-9
- [23] WEI Ning, CUI Erqian, HUANG Kun, et al. Decadal stabilization of soil inorganic nitrogen as a benchmark for global land models [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, **11**: 1088–1099. DOI: 10.1029/2019MS001633
- [24] HEUCK C, WEIG A, SPOHN M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **85**: 119–129. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.02.029
- [25] TIAN Liming, ZHAO Lin, WU Xiaodong, et al. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland [J]. Science of the Total Environment, 2018, **622–623**: 192–202. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.331
- [26] LIU Ming, LI Zhongpei, ZHANG Taolin. Changes of soil ecological stoichiometric ratios under different land uses in a small catchment of subtropical China [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil and Plant Science, 2015, **66**(1): 67–74. DOI: 10.1080/09064710.2015.1064539
- [27] NYLE C B, RAY R W. 土壤学与生活[M]. 14 版. 李保国, 徐建明, 等译. 北京: 科学出版社, 2019: 117. [NYLE C B, RAY R W. The nature and properties of soils [M]. 14th ed. Translated by LI Baoguo, XU Jianming, et al. Beijing: Science Press, 2019: 117]

Soil C, N, and P Ratios and Their Environmental Controls along Elevation Gradients of Subsoil: A Case Study of Mt. Daweishan of Eastern Hunan Province, China

HUANG Dezhi, SHENG Hao*, YIN Zerun, XUE Yi, TIAN Yu

(College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: It is quite necessary to investigate the relationship between soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) in mountain subsoil due to little concerns to be paid to the subject yet. At present, the topsoil and the soil profile were researched, mostly. There are few related studies on subsoil, and the effects of

altitude, vegetation, slope and aspect on the ratio were not comprehensively considered. Understanding the stoichiometric ratio variations with environmental factors along elevation gradients in mountains can reveal the influencing factors of spatial variation to soil nutrients. In this study, Mt. Daweishan of eastern Hunan province in China was targeted as a case study and 20 sample plots were allocated along elevation gradients in the field. The SOC, TN, and TP contents of the samples were measured to interpret the relationship between the stoichiometric ratios of soil C, N, and P, and their environmental factors. The findings are those: (1) SOC, TN, and TP contents in soil profiles were significantly positively correlated with elevation. And SOC, TN, and TP contents were significantly positively correlated with each other, indicating the coupling of C, N, and P in subsoils. (2) The ratios of C:N, C:P, and N:P ranged from 12.3 to 97.8, 30.6 to 367.3, and 0.5 to 16.9, respectively, and C:N:P average ratio was 72:3.8:1 in topsoil, which much higher than those in subsoils (18:1.4:1). (3) The topography (elevation and slope aspect) and soil physicochemical properties (CEC and soil texture) were the main factors for the stoichiometric ratios of soil C, N, and P element in Mt. Daweishan. This study is helpful to understand the biogeochemical cycle characteristics of soil elements and provide reference for scientific conservation of mountain soil ecosystems.

Key words: soil fertility; subsoil; stoichiometry ratios; environmental factor; Mt. Daweishan