

文章编号: 1008 - 2786 - (2016) 4 - 385 - 08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000142

贡嘎山燕子沟土壤磷海拔梯度特征及影响因素

周俊, 郝海健, 吴艳宏*, 孙守琴, 罗辑

(中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 土壤磷生物地球化学特征受岩性、气候、土壤年龄、理化性质、地形、植物和微生物活动等因素的共同影响。山地植被和土壤垂直带谱为研究这些因素的相对重要性提供了理想试验场。选取未受人类破坏的贡嘎山燕子沟 5 个垂直植被带(裸地、高山灌丛带、暗针叶林带、针阔混交林带和阔叶林带,海拔分别为 3 761 m、3 600 m、3 403 m、2 700 m 和 2 334 m),采集了 40 个土样,测定了土壤的基本理化性质,并采用连续提取法测定了土壤的生物有效磷、铝结合态磷、铁结合态磷、原生矿物磷、有机磷和残余态磷。结果表明,燕子沟土壤 A 层部分磷形态的空间分布呈现明显的垂直地带性特征。土壤 A 层原生矿物磷随海拔的降低而显著降低,有机磷则呈现与原生矿物磷相反的变化趋势。而生物有效磷始终较低,次生矿物磷(铝和铁结合态磷)也较低,残余态磷的含量变化不大,始终是土壤总磷的最大组分。在高海拔地区原生矿物磷是总磷的第二大组分,而在低海拔地区,有机磷则成为总磷的第二大组分。植物是控制燕子沟土壤磷空间分布的相对重要因素,植物一方面通过控制土壤 pH 进而影响土壤原生矿物磷的含量,另一方面直接吸收生物有效磷,并将其转化为有机磷,导致有机磷随海拔降低而显著增加。此外,植物还通过“泵吸作用”导致总磷在土壤剖面上呈现由表层到底层降低的分布模式。次生矿物磷含量较低表明地球化学作用在影响燕子沟土壤磷生物有效性的作用相对较小。

关键词: 生物有效磷; 磷形态; 生物地球化学; 垂直地带性; 燕子沟; 贡嘎山

中图分类号: P593

文献标志码: A

磷(P)是植物生长的必需营养元素之一,其有效供给是维持山地生态系统稳定的基础^[1]。磷的生物有效性通常受岩性^[2]、土壤年龄^[3]、气候^[4]、土壤理化性质^[5]、地形^[2]和生物活动(植被类型和微生物活动)^[6]等因素的影响。先前的研究通常选取土壤时间序列(具有较为明确的年龄)^[7]、气候序列(具有较为明确的温度或水分梯度变化)^[8]、生物序列(植被类型的梯度变化)^[9]或地形序列^[10]来研究土壤年龄、气候、植被或地形等单因素对土壤磷生物有效性的影响。然而,在大多数生态系统中,土壤磷的生物有效性受到上述因素的共同影响。单因素研究得到的结果很难准确地解释这些生态系统中磷生物有效性与各种环境和生物要素之间的关系。

此外,由于磷循环与碳(C)、氮(N)循环之间存在密切的耦合关系,越来越多的科学家意识到要准确地评估全球碳、氮收支,准确地模拟磷循环是一个重要前提^[11]。在构建磷循环模型的过程中,为简化模型并使其具有较广的适用性,需要评估上述各种磷有效性影响因素的相对重要性^[2]。然而,单因素研究的结果无法回答这个问题。

在具有巨大高差的山地中,随着海拔梯度的变化,温度和水分发生梯度变化,进而形成山地植被和土壤垂直带谱,为研究气候、土壤性质和植被类型变化对山地生态系统磷生物有效性综合影响,评估磷影响因素的相对重要性提供了“天然”试验场。目前关于土壤磷生物有效性随海拔梯度变化的模式和

收稿日期(Received date): 2015 - 10 - 29; 修回日期(Accepted): 2015 - 11 - 29。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41401253 和 41272200)资助。[Supported by the National Natural Science Foundation of China (41401253 and 41272200).]

作者简介(Biography): 周俊(1983 -)男,博士,研究方向为营养元素生物地球化学。[Zhou Jun, born in 1983, male, PhD, studying in biogeochemistry of nutrients.] E-mail: zhoujun@imde.ac.cn

* 通信作者(Corresponding author): 吴艳宏[Wu Yanhong], Tel: 028 - 85257118; E-mail: yhwu@imde.ac.cn

机制尚有一定争议。一些研究发现随着海拔的降低,温度逐渐升高,导致凋落物中有机磷矿化速率升高,因此土壤有效磷会逐渐升高^[12]。然而,根据 Walker 和 Syers 提出的磷随土壤年龄的演化模式,土壤风化和发育程度会随海拔降低而增强,生物有效磷会逐渐被转化为有机磷和闭蓄态磷,所以土壤磷有效性会逐渐降低^[7]。最近在瑞典高寒地区一个海拔梯度序列的研究发现,尽管温度变化极大地影响着土壤磷的生物有效性,但其影响程度受植被类型的控制^[13]。因此,需要开展更多相关研究,为阐明土壤磷生物地球化学随海拔梯度的变化模式和机制提供案例。

本文选取远离人类活动的贡嘎山燕子沟,利用土壤磷连续提取技术,分析土壤磷形态及生物有效性随海拔梯度的变化,探讨温度、水分、土壤性质和植被类型对土壤磷生物地球化学特征的影响,以回答以下问题:1. 土壤磷形态及生物有效性沿海拔梯度的分布是否与植被带谱相似,也具有一定的垂直带谱特征? 2. 哪些因素控制着土壤磷形态及生物有效性沿海拔梯度的分布模式?

1 研究区概况

贡嘎山燕子沟位于青藏高原东缘(图1),东西走向,主要受东亚季风的控制^[14]。燕子沟冰川从贡嘎山主峰(海拔:7 556 m)向下延伸至约海拔 3 700 m 左右。沟内主要岩石为黑云母花岗岩^[15],成土母质多来自冰碛物。燕子沟位于海螺沟以北约 10 km,其气候特征和植被带谱与海螺沟较为相似。海拔由低至高形成了完整的亚热带山地植被垂直带谱:1 100 ~ 2 400 m: 常绿阔叶林带;2 400 ~ 2 800 m: 针阔混交林带;2 800 ~ 3 580: 暗针叶林带;3 580 ~ 4 200: 灌丛草甸带;4 200 ~ 4 600 m: 草甸带;4 600 ~ 4 900 m: 疏草寒漠带;海拔 4 900 m 为雪线^[14]。根据位于海螺沟的中国科学院贡嘎山高山森林生态站的监测,该地区海拔 1 600 m 处多年年均温为 12.7℃,多年年均降水量为 1 033.7 mm;3 000 m 处多年年均温为 4.2℃,多年年均降水量为 1 947.4 mm^[16]。

2 研究方法

2.1 样品采集

2010年5月按照植被带分布情况及可达性,选

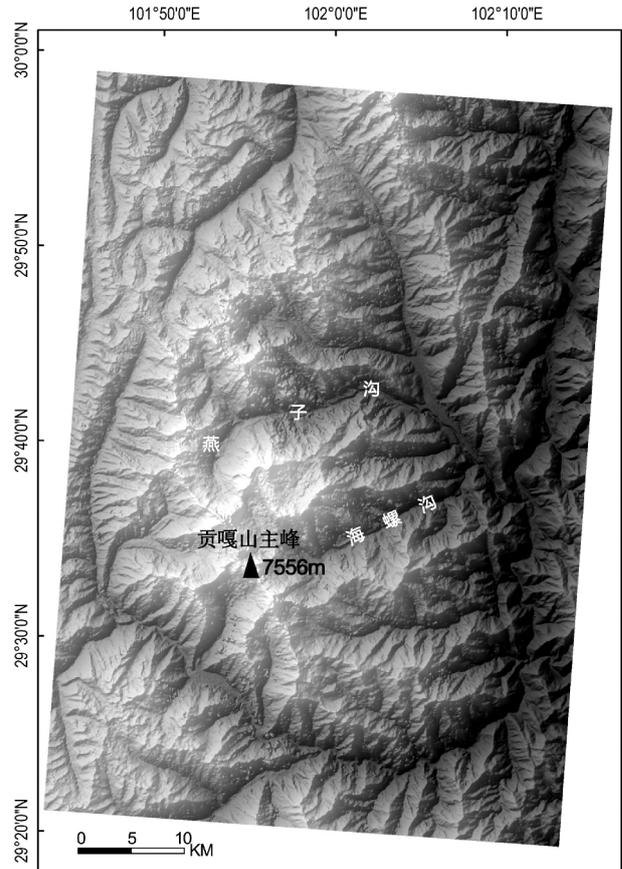


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location of the Yanzigou Mt. Gongga.

择5个带谱沿海拔由高至低采集土壤样品(表1)。采用人工挖掘的方式挖开土壤剖面,将土壤剖面由上至下分为以下层次:O层,分解强烈的凋落物层;A层,有机质积累层和淋溶表层;B层:淀积层;C层:母质层。剖面挖开后由下向上分层采集土样。采集的土样使用干净的聚乙烯塑料袋于保温箱中盛放。由于3 761 m样点为裸地,尚未发育成熟土样,因此在此处采集表层0~10 cm的冰碛物细颗粒物。海拔最低的2 334 m样点无O层,故未采集O层样品。

2.2 样品测定

采集的土样带回实验室晾干,过2 mm筛待测。土壤粒径组成采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定。TOC(总有机碳)和TN(总氮)采用 Elementar Vario EL 测定(TOC检测限0.050%,TN检测限0.015%)。土壤pH采用玻璃电极法测定(水土比1:2.5,pH计: EUTECH™, pH6⁺,玻璃电极: 7252101B)。用玛瑙研钵磨细(过100目筛)后的土样测定TP(Total P,总磷),方法为EPA Method 200.7

表1 采样点概况

Tab.1 General characteristics of sampling sites

样号	海拔/m	温度 ^① /°C	降水 ^② /mm	剖面数量	剖面描述	土壤类型 ^③	植被类型/优势种
1	3 761	-0.41	2 777	5	冰碛物,尚未发育土壤,采集0~10 cm 表层细粒冰碛物 O: 0.5~1 cm 黑棕色	裸地	裸地,偶见苔藓、黄芪
2	3 600	0.56	2 687	2	A: 1~3 cm 棕褐色 B: 2~3 cm 棕色 C: 未见底,青灰色 O: 1~2.5 cm 棕黑色	亚高山灌丛草甸土	灌丛: 杜鹃、柳树
3	3 403	1.76	2 508	3	A: 4 cm 棕色 B: 2~3 cm 棕黄色 C: 未见底,黄色 O: 1~2 cm 棕黑色	山地暗棕壤	暗针叶林: 峨眉冷杉、杜鹃
4	2 700	6.03	1 869	3	A: 3.5~9 cm 棕褐色 B: 4~10 cm 棕色 C: 未见底,黄色 O: 无	山地棕壤	针阔混交林: 峨眉冷杉、槭、杜鹃
5	2 334	10.08	1 537	1	A: 8 cm 褐色 B: 7 cm 棕黄色 C: 未见底,黄色	山地黄棕壤	阔叶林: 槭

注: ①: 年平均气温,各海拔温度数据根据 Wu 等(2013)^[16] 数据插值。②: 年平均降水,各海拔降水数据根据 Sun 等^[17] 观测数据和公式估算。③: 土壤类型数据引自文献^[18]。

(Revision 5.0, Jan. 2001) (Office of Science and Technology, U. S. Environmental Protection Agency, 2001) 所用仪器为 ICP-AES 检测限为 0.02 mg/L。

采用改进的 Ruttenberg 土壤 P 连续提取法^[19] 提取各形态磷,提取出的磷采用钼锑抗比色法测定,所用紫外可见分光光度计为 SHIMADZU UV2450,检测限为 0.01 mg/L。样品测定过程中均设定 3 个空白样,随机选取 50% 的样品测定平行样,平行样误差小于 5%。连续提取法的步骤如下: 1) Ex-P: 交换态磷(生物有效磷)采用 1 M MgCl₂ 溶液提取; 2) Al-P: 铝结合态磷,采用 0.5 M NH₄F 溶液提取; 3) Fe-P: 铁结合态磷,采用 1 M NaOH-0.5 M Na₂CO₃ 溶液提取; 4) Ca-P: 钙磷(主要为原生矿物磷)采用 1 M HCl 溶液提取; 5) OP: 有机磷,采用灼烧法测定; 6) Res-P: 残余态磷,为总磷与上述 5 种磷形态之差。

3 结果

3.1 土壤理化性质随海拔梯度的变化

海拔由高到低,土壤 C 层粒径组成变化不大

(图 2a) 粘粒含量很低,介于 2.59%~5.44% 之间。而 A 层则呈现显著的变化趋势(图 2b)。尽管 A 层粘粒含量与 C 层相比增加量较小,但是呈现出明显的由高海拔向低海拔升高的趋势(图 2b)。细粉砂也具有与粘粒相似的变化趋势。而砂的比例则随着海拔的降低而显著降低(图 2b)。

燕子沟未风化土壤母质呈弱碱性(图 3, 3 761 m 样点)。总体来看,随着海拔的降低,土壤 pH 逐渐降低,但最低值出现在 2 700 m 样点(图 3)。

3.2 土壤磷的海拔梯度特征

3.2.1 土壤 TOC、TN、TP 的梯度特征

总体来看,燕子沟土壤 A 层(3 761 m 样点为表层细粒冰碛物) TOC 和 TN 随海拔的变化趋势高度一致,均随海拔的降低而升高,但是在 2 700 m 样点处达到最高值(图 4)。O 层和 A 层 TP 随海拔变化的趋势不明显,二者的最高值也出现于 2 700 m 样点(图 5)。B 层和 C 层 TP 呈随海拔降低而降低的趋势(图 5)。从 TP 浓度在土壤剖面上的分布来看,表层土壤的 TP 浓度均高于下层土壤(图 5)。这种分布模式在 2 700 m 样点最为显著,O 层和 A 层土壤 TP 浓度显著地高于 B 和 C 层土壤。除 2 700 m 样点外,其他样点 O 层 TP 均低于 A 层。

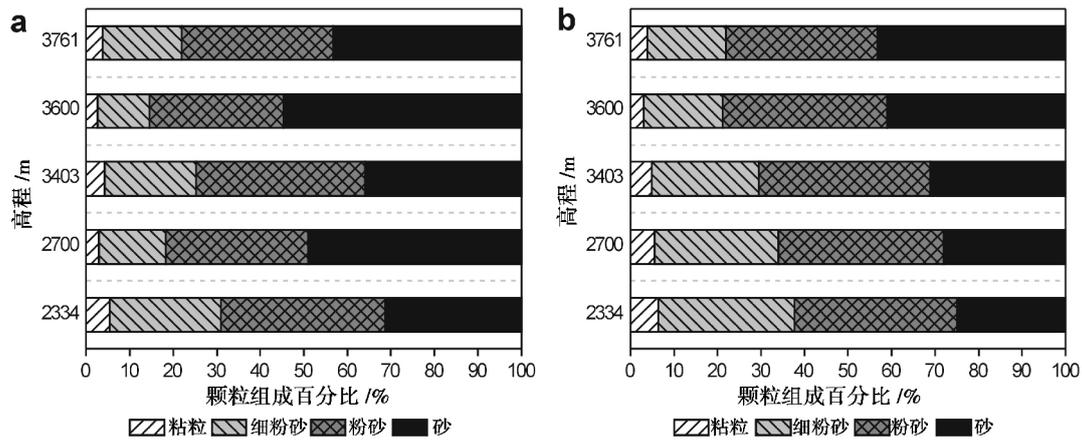


图2 粒度组成变化图(a: C层 b: A层) (土壤粒径分类标准: 粘粒: <math>< 2 \mu\text{m}</math> 细粉砂:
 Fig.2 Changes in soil composition with altitude (a: C horizon b: A horizon)

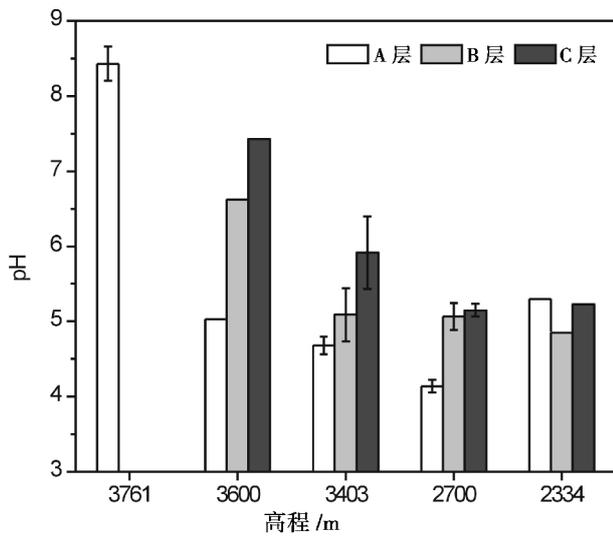


图3 土壤 pH 随高程变化图
 Fig.3 Changes in soil pH with altitude

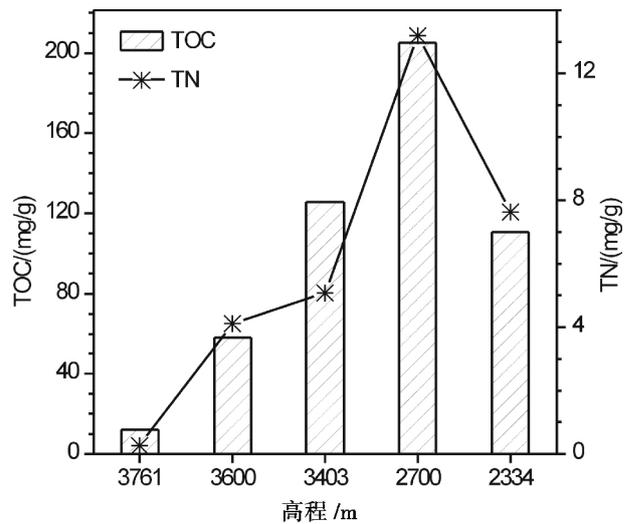


图4 A层 TOC(总有机碳)和 TN(总氮)变化图
 (3 761 m 样点为表层细粒冰碛物)
 Fig.4 Changes in TOC and TN in the A horizon with altitude

3 761 m 样点土壤 A 层 C: N、C: P 和 N: P 比值与其他几个样点均显著地不同(表 2)。从空间分布趋势来看, C: P 和 N: P 比随海拔升高逐渐降低, 从 3 600 m 至 2 334 m 处 C: N 比的变化则没有 C: P 和 N: P 显著(表 2)。

表 2 土壤 A 层 C、N、P 比值梯度变化

Tab.2 Ratios of C, N and P in the A horizon with altitude

样号	海拔/m	C: N	C: P	N: P
1	3 761	574.53	21.90	0.46
2	3 600	15.05	105.89	7.48
3	3 403	25.25	209.52	8.46
4	2 700	15.71	250.61	16.11
5	2 334	14.47	201.37	13.92

3.2.2 土壤磷形态的梯度特征

由于 A 层为受温度、水分、土壤理化性质和生物活动影响最强烈的土层, 因此, 本研究主要对 A 层土壤的 P 形态展开详细分析。土壤 A 层 P 形态随海拔梯度的分布呈现不同的特征(图 6)。尽管生物有效磷(Ex-P)浓度较低, 随着海拔的降低略有升高随后降低, 在 2 700 m 样点达到最高值(46.06 mg/kg, 占 TP 的 5.42%), 最低值出现于海拔最低点(占 TP 的 0.53%)。铁结合态磷(Fe-P)在海拔最高点(3 761 m)非常低, 在该点以下虽有小幅增加, 但含量一直较低。而大部分样点的铝结合态磷含量低于检测限。原生矿物磷(Ca-P)和有机磷(OP)展现了显著的垂直地带性特征。Ca-P 含量随着海

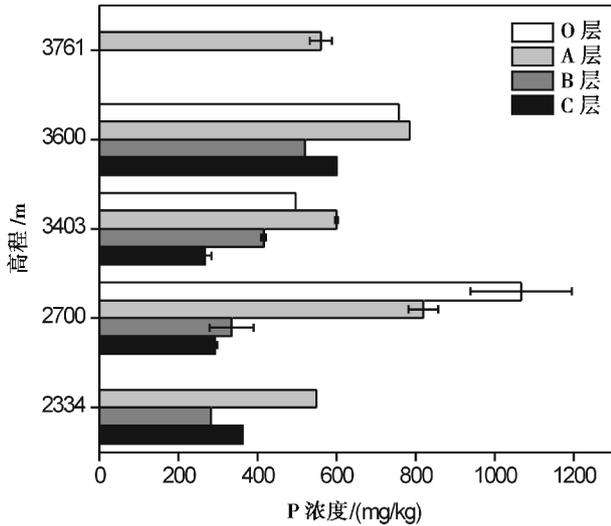


图 5 TP 随高程变化图

Fig. 5 Changes in TP concentration with altitude

拔的降低而快速地降低; 而 OP 含量则快速地增加, 其变化趋势与 TOC 一致。残余态磷(Res - P) 占 TP 的比例随着海拔的降低略微有所增加(图 6)。各磷形态中, Res - P 始终是 TP 的第一大组分; 在高海拔地区, Ca - P 是第二大组分, 而在较低海拔地区, OP 取代 Ca - P 成为土壤 TP 的第二大组分(图 6b)。

4 讨论

4.1 土壤理化性质的变化

随海拔降低, 土壤 A 层土壤粘粒成分的增加和砂含量显著的降低(图 2b), 是温度升高和植被逐渐发育导致化学和生物风化作用逐渐增强而造成的。

土壤 pH 由碱性向酸性的变化, 主要受植物的控制。随着海拔的降低, 植被更加发育, 凋落物增多, 凋落物分解产生更多的酸性物质, 从而导致土壤 A 层 pH 的降低。在以针叶林为优势种的暗针叶林带和针阔混交林带, 土壤 pH 最低, 主要是由于针叶树种一方面分泌有机酸的能力更强^[20], 另一方面, 针叶林凋落物的酸性更低^[21-22]。而低海拔样点土壤 B 层和 C 层 pH 值的降低, 则是由于淋滤作用将表层有机质带到底层的结果。

4.2 植物对 TN、TP 分布的控制

土壤 TN 随海拔升高而降低是由植被类型控制的。土壤 N 主要来源于凋落物的分解^[23]; 而根据罗辑等的调查, 贡嘎山东坡从海拔 2 200 m 到 3 580 m (落叶阔叶 - 常绿阔叶混交林带到亚高山针叶林带), 凋落物产量逐渐降低, 凋落物的 N 归还量也从落叶阔叶 - 常绿阔叶混交林的 50.5 kg/(a · hm²) 降低到针叶林带的平均 31.8 kg/(a · hm²)^[24]。

低海拔带谱中表层 TP 浓度显著高于底层土壤 TP 浓度的分布模式, 从一定程度上展现了地球化学作用和生物活动对 TP 在土壤垂直剖面上分布的共同影响。不过, 这种模式更能展示植物对 TP 垂直分层的控制作用。例如, 在 2 700 m 样点, 温度较高海拔地区高很多, 风化作用更强, 能够作用于更深的土层; 另一方面, 植物对 P 的需求量较大, 表层土壤中的 P 可能已无法满足其生长所需, 需要吸收更深层土壤中的 P, 并通过凋落物分解的形式将 P 归还至土壤表层, 因此表层比下层土壤的 TP 浓度更高。Jobbágy 和 Jackson 认为这种分布模式只能解释为植物对 P 在垂直分布上的“泵吸作用”强于淋滤

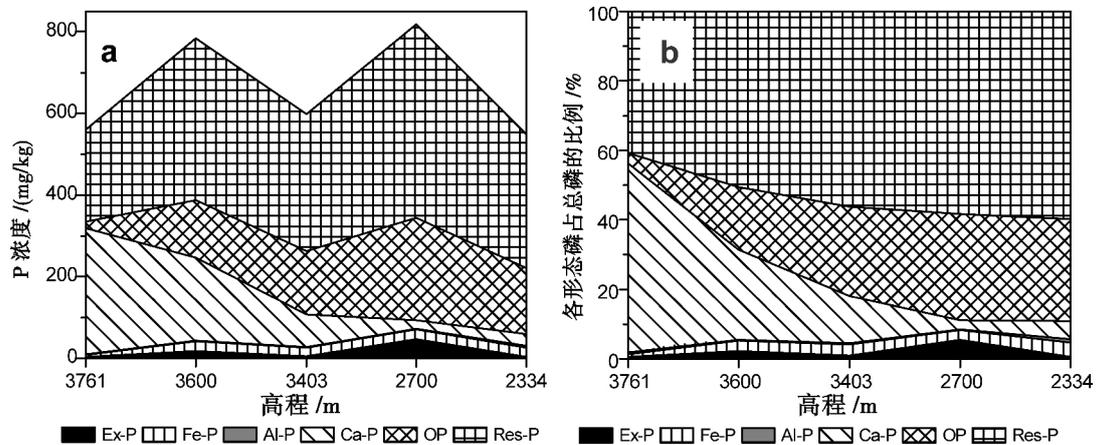


图 6 土壤 A 层磷形态浓度(a) 及其占 TP 比例(b) 随海拔梯度的变化

(Ex - P: 生物有效磷、Fe - P: 铁结合态磷、Al - P: 铝结合态磷、Ca - P: 原生矿物磷、OP: 有机磷、Res - P: 残余态磷)

Fig. 6 Changes in concentrations (a) and contributions (b) of soil P forms in the A horizon with altitude

等地球化学作用^[25]。

与同属贡嘎山东坡的海螺沟(A层TP平均浓度 $1\,155 \pm 196\text{ mg/kg}$)^[26]相比,燕子沟土壤中TP平均浓度($662 \pm 115\text{ mg/kg}$)更低。这可能是两个研究区成土母质的差异造成的。海螺沟土壤C层中TP平均浓度约为 $1\,206\text{ mg/kg}$ ^[26],而燕子沟土壤层中TP平均浓度仅约为 380 mg/kg 。虽然两个研究区TP浓度差异较大,但是,表层土壤TP浓度随海拔梯度的变化却有相似的趋势:总体上,两个研究区A层土壤TP浓度均随海拔降低而降低。这种相似的空间变化趋势进一步表明了植物对土壤TP的控制作用。即无论成土母质中原生矿物磷含量的多少,植物均能对土壤TP在海拔梯度上的分布产生重要影响。

4.3 影响P形态分布呈垂直地带性特征的因素

Ca-P浓度随海拔的变化与pH的变化趋势基本一致(图3,图6)。Ca-P代表土壤矿物中能与土壤溶液直接接触的磷灰石或易于被弱酸溶解的其他矿物包裹的原生矿物磷^[27],是风化程度低的土壤中磷的主要来源。因此,土壤pH的降低会导致Ca-P的快速减少。而本研究中土壤pH降低的一个重要原因是植被的作用。因而,可以认为植物通过控制土壤的pH,进而导致燕子沟表层土壤原生矿物磷的降低。

总体来看,虽然燕子沟生物有效磷(Ex-P)的含量始终较低(平均浓度为 13.6 mg/kg)(图6a),但却高于我国热带地区表层土壤中的有效磷浓度(最大值为 4.5 mg/kg)^[28]。从 $3\,761\text{ m}$ 至 $2\,700\text{ m}$,生物有效磷(Ex-P)逐渐升高,可能是由于该样点与高海拔地区相比,温度明显更高,微生物活动更加强,有更多的凋落物中的磷被返还到土壤中;即温度通过控制微生物活动从而影响土壤生物有效磷含量。另一方面则可能是原生矿物磷(Ca-P)因较低的pH而被大量释放出来,从而导致生物有效磷的增加。Kitayama等在Mount Kinabalu的研究也发现Ca-P可能是该地区生物有效磷的一个重要来源^[29]。从 $2\,700\text{ m}$ 至 $2\,334\text{ m}$,生物有效磷明显降低,与Walker和Syers的P演化模型^[7]的预测一致。不过,由于Al-P和Fe-P浓度较低(图6),表明风化作用导致的次生矿物对磷的吸附作用较小,这说明可能还有其他影响土壤有效磷变化的因素。先前的研究发现贡嘎山东坡森林对磷的需求量随海拔的降低而增加^[30],表明植物对磷需求的增加可能是

导致生物有效磷降低的主要原因。Unger等在厄瓜多尔一个热带森林也有类似的发现。该研究发现因植物需磷量随海拔升高的降低,导致有机质层和矿质土壤层的土壤有效磷随海拔逐渐升高^[31]。

OP主要来自植物凋落的分解和微生物的同化作用,其含量随着海拔降低而显著增高(增幅为26%)展现了植物和微生物作用随着海拔的降低而不断增强的事实。但微生物在其中起多大的作用,则需更深入的研究。Ca-P的显著降低和OP的显著增加,充分展示了植物在控制燕子沟土壤磷形态转换中的主导作用。植物通过降低土壤pH大量溶解原生矿物磷(Ca-P降低),一部分被释放的磷(Ex-P)被植物吸收进入生物圈,并通过凋落物分解的形式再返还到土壤圈(OP增加)。

被土壤溶液溶解释放的部分原生矿物磷进入土壤溶液后,极易被土壤中具有极大比表面积的次生矿物(如无定形铁和铝)吸附,成为次生矿物磷(如铁结合态磷和铝结合态磷)^[32]。由于燕子沟土壤发育程度很低,不太可能具有高含量的次生矿物,因此,可以发现Fe-P和Al-P的含量始终较低(图6)。这说明地球化学吸附作用对燕子沟土壤磷形态的转化影响有限。

Res-P代表土壤中被各种抗风化能力很强的硅酸盐包裹的无机磷。因此,即使土壤pH最低已达 4.14 (图3),也无法将这些形态的磷溶解,除了 $3\,761\text{ m}$ 样点,Res-P始终是TP的最大组分(图6b)。

5 结论

燕子沟土壤原生矿物磷和有机磷的空间分布呈现显著的垂直地带性特征。植物一方面通过控制土壤pH进而影响土壤磷形态的变化;另一方面通过吸收转化无机磷成为有机磷,成为控制土壤磷分布呈垂直地带特征的主要因素。此外,植物还通过其强烈的“泵吸作用”控制着磷在土壤剖面上的分层分布模式。在燕子沟这种土壤发育较弱的土壤中,铁、铝氧化物吸附等地球化学作用对磷形态的影响作用相对较小。

参考文献(References)

- [1] Wu Y, Zhou J, Yu D, et al. Phosphorus biogeochemical cycle research in mountainous ecosystems [J]. Journal of Mountain Science 2013, 10(1): 43-53

- [2] Mage S M ,Porder S. Parent material and topography determine soil phosphorus status in the Luquillo Mountains of Puerto Rico[J]. *Ecosystems* 2013 ,16(2) : 284 – 294
- [3] Zhou J ,Wu Y ,Prietzl J ,et al. Changes of soil phosphorus speciation along a 120 – year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain ,SW China) [J]. *Geoderma* 2013 , 195: 251 – 259
- [4] DeLonge M ,Vandecar K L ,D' Odorico P ,et al. The impact of changing moisture conditions on short-term P availability in weathered soils[J]. *Plant and Soil* 2013 ,365: 1 – 9
- [5] Celi L ,Cerli C ,Turner B L ,et al. Biogeochemical cycling of soil phosphorus during natural revegetation of *Pinus sylvestris* on disused sand quarries in Northwestern Russia [J]. *Plant and Soil* ,2013 , 367: 121 – 134
- [6] Lambers H ,Raven J A ,Shaver G R ,et al. Plant nutrient – acquisition strategies change with soil age[J]. *Trends in Ecology & Evolution* 2008 23(2) : 95 – 103
- [7] Walker T W ,Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis [J]. *Geoderma* ,1976 ,15(1) : 1 – 19
- [8] Litaor M I ,Seastedt T R ,Walker M D ,et al. The biogeochemistry of phosphorus across an alpine topographic/snow gradient [J]. *Geoderma* 2005 ,124(1) : 49 – 61
- [9] Kauffman J B ,Cummings D L ,Ward D E. Relationships of fire biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado[J]. *Journal of Ecology* ,1994 82: 519 – 531
- [10] Tiessen H ,Chacon P ,Cuevas E. Phosphorus and nitrogen status in soils and vegetation along a toposequence of dystrophic rainforests on the upper Rio Negro[J]. *Oecologia* ,1994 99(1 – 2) : 145 – 150
- [11] Wang Y P ,Law R M ,Pak B. A global model of carbon ,nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere [J]. *Biogeochemistry* 2010 7(7) : 2261 – 2282
- [12] Vitousek P M ,Matson P A ,Turner D R. Elevational and age gradients in hawaiian montane rainforest-*foliar* and soil nutrients [J]. *Oecologia* ,1988 77: 565 – 570
- [13] Sundqvist M K ,Wardle D A ,Vincent A ,et al. Contrasting nitrogen and phosphorus dynamics across an elevational gradient for subarctic tundra heath and meadow vegetation [J]. *Plant and Soil* 2014 , 383(1 – 2) : 387 – 399
- [14] Zhong X H ,Zhang W J ,Luo J. The characteristics of the mountain ecosystem and environment in the Gongga Mountain region [J]. *AMBIO* ,1999 28: 648 – 654
- [15] 吕儒仁. 贡嘎山区一次特大泥石流 [J]. 冰川冻土 ,1992 ,14(2) : 174 – 177 [Lv Ruren. An extreme heavy debris flow in Mt. Gongga[J]. *Journal of Glaciology and Geocology* ,1992 ,14(2) : 174 – 177]
- [16] Wu YH ,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: 370 – 377
- [17] Sun S Q ,Wu Y H ,Wang G X ,et al. Bryophyte species richness and composition along an altitudinal gradient in Gongga Mountain , China [J]. *PLoS one* 2013 8(3) : e58131
- [18] 余大富. 贡嘎山的土壤及其垂直地带性 [J]. 1986 ,*土壤通报* , 1984 ,15(2) : 65 – 68 [Yu D. Vertical zonal characteristics of soil in Gongga Mountain [J]. *Chinese Journal of Soil Science* ,1984 , 15(2) : 65 – 68]
- [19] 朱广伟 ,秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究 [J]. *农业环境科学学报* ,2003 22(3) : 349 – 352 [Zhu Guangwei ,Qin Boqiang. Chemical sequential extraction of phosphorus in lake sediments [J]. *Journal of Agro – Environment Science* , 2003 22(3) : 349 – 352]
- [20] Augusto L ,Turpault M P ,Ranger J. Impact of forest tree species on feldspar weathering rates [J]. *Geoderma* 2000 96(3) : 215 – 237
- [21] Ovington J D. Studies of the development of woodland conditions under different trees: I. Soils pH [J]. *Journal of Ecology* ,1953 41(1) : 13 – 34
- [22] Raulund – Rasmussen K ,Vejre H. Effect of tree species and soil properties on nutrient immobilization in the forest floor [J]. *Plant and Soil* ,1995 ,168(1) : 345 – 352
- [23] Vitousek P M ,Sanford R L. Nutrient Cycling in Moist Tropical Forest [J]. *Annu Rev Ecol Syst* ,1986 ,17: 137 – 167
- [24] 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 Ji ,Cheng Genwei ,Chen Binru ,et al. Characteristic of forests litterfall along vertical spectrum on the Gongga Mountain [J]. *Mountain Research* 2003 21(3) : 287 – 292]
- [25] Jobbágy E G ,Jackson R B. The uplift of soil nutrients by plants: biogeochemical consequences across scales [J]. *Ecology* 2004 85(9) : 2380 – 2389
- [26] 吴艳宏 ,周俊 ,郝海健 ,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 [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment* ,2012 ,34(3) : 70 – 74]
- [27] Nezat C A ,Blum J D ,Yanai R D ,et al. A sequential extraction to determine the distribution of apatite in granitoid soil mineral pools with application to weathering at the Hubbard Brook Experimental Forest ,NH ,USA [J]. *Applied Geochemistry* 2007 22(11) : 2406 – 2421
- [28] 徐馨 ,王法明 ,邹碧 ,等. 不同林龄木麻黄人工林生物多样性与土壤养分状况研究 [J]. *生态环境学报* 2013 22(9) : 1514 – 1522 [Xu Xin ,Wang Faming ,Zou Bi ,et al. Biodiversity and soil nutrient research of *Casuarina Equisetifolia* plantation at different stand ages [J]. *Ecology and Environmental Sciences* ,2013 ,22(9) : 1514 – 1522]
- [29] Kitayama K ,Majalap – Lee N ,Aiba S. Soil phosphorus fractionation and phosphorus-use efficiencies of tropical rainforests along altitudinal gradients of Mount Kinabalu ,Borneo [J]. *Oecologia* , 2000 ,123(3) : 342 – 349
- [30] 罗辑 ,程根伟 ,李伟 ,等. 贡嘎山天然林营生元素生物循环特征 [J]. *北京林业大学学报* 2005 27(2) : 13 – 17 [Luo Ji ,Cheng Gengwei ,Li Wei ,et al. Characteristics of nutrient biocycling of natural forest on the Gongga Mountain [J]. *Journal of Beijing for-*

- estry university 2005 27(2): 13-17]
- [31] Unger M, Leuschner C, Homeier J. Variability of indices of macro-nutrient availability in soils at different spatial scales along an elevation transect in tropical moist forests (NE Ecuador) [J]. Plant and soil 2010 336(1-2): 443-458
- [32] Johnson A H, Frizano J, Vann D R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure[J]. Oecologia 2003 135(4): 487-499

Variations in Soil P Biogeochemistry and Its Impact Factors along an Altitudinal Gradient in the Yanzigou Eastern Slope of the Gongga Mountain

ZHOU Jun, BING Haijian, WU Yanhong, SUN Shouqin, LUO Ji

(Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Soil phosphorus (P) biogeochemistry is subjected to lithology, climate, topography, soil age and physical-chemical properties of soils, activities of plants and microbes. Mountains, with vertical belts of soils and vegetation due to large altitudinal differences, are ideal experimental areas to evaluate relative importances of these impact factors. In order to investigate spatial patterns of soil P biogeochemistry and impact factors, forty soil samples were collected at five different vegetation belts, which were bare area (3 761 m asl (above sea level)), alpine shrub vegetation (3 600 m asl), dark coniferous forests (3 403 m asl), coniferous and broad leaved forests (2 700 m asl), and broad leaved forests (2 334 m asl). In addition to find out soil physical-chemical properties, soil P forms in A horizon were measured and separated into bioavailable P (Ex-P), Al bound P (Al-P), Fe bound P (Fe-P), Ca bound P (Ca-P), organic P (OP), and residual P (Res-P) by a sequential extraction technique. Our results showed that the spatial distributions of soil P forms revealed an obvious vertical zonation. The Ca-P concentrations in the A horizon decreased significantly with decreasing elevations. In contrast, OP concentrations in the A horizon increased significantly downslope. The concentrations of Ex-P, Fe-P and Al-P were always low across the five belts. Res-P concentrations changed rarely along slope gradient and accounted for the largest portion of total P except at the 3 761 m site. In the high altitude sites, the Ca-P was the second largest part of total P; while in the low altitudinal zones, OP became the second largest part of TP. The influences of vegetation on soil P spatial distributions are more important than those of geochemical processes. We confirmed plants control soil pH and further impact Ca-P contents in soils. Plants transform inorganic P into OP by directly assimilating Ex-P, and thus cause a large increase of OP. In addition, the distribution pattern that total P concentrations in topsoil are higher than that in bottom is mainly a result of "pumping" of plants. The low contents of secondary mineral P (Fe-P and Al-P) indicates that the effects of geochemical processes (e.g. absorption) on soil P bioavailability are relatively small.

Key words: bioavailable phosphorus; phosphorus forms; biogeochemistry; vertical zonation; Yanzigou; Gongga Mountain