

# 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征

李相楹<sup>1</sup>, 张维勇<sup>2</sup>, 刘峰<sup>2</sup>, 张珍明<sup>3</sup>, 何腾兵<sup>1</sup>, 林昌虎<sup>1,4</sup>

(1. 贵州大学, 贵阳 550025; 2. 贵州梵净山国家级自然保护区管理局, 贵州 铜仁 554400;  
3. 贵州省生物研究所, 贵阳 550009; 4. 贵州医科大学, 贵阳 550025)

**摘要:**为探明梵净山地区海拔高度与土壤性质间的关系,在不同海拔高度采集不同深度土层土样,测定土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷含量。结果表明:在不同采样深度下,随着土层深度的增加,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷以及碳氮比、碳磷比和氮磷比均逐渐下降。在不同海拔高度下,受气候、生物和地形等因素的影响,0—20 cm 层土壤中有有机质、碱解氮含量与海拔高度显著相关,有机质含量随海拔的增加呈先增加后下降的趋势,在海拔 1 450 m 达到最大值,碱解氮含量随海拔的增加而增加;20—40 cm 层土壤各项指标与海拔高度相关度不紧密;40—60 cm 层土壤中,有机质、全氮含量、碳磷比、氮磷比与海拔高度显著相关,均随海拔的增加而增加。

**关键词:**海拔高度; 梵净山; 碳; 氮; 磷; 分布特征

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0019-06

## The Distribution Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus at Different Altitudes in Fanjingshan Mountain

LI Xiangying<sup>1</sup>, ZHANG Weiyong<sup>2</sup>, LIU Feng<sup>2</sup>, ZHANG Zhenming<sup>3</sup>, HE Tengbing<sup>1</sup>, LIN Changhu<sup>1,4</sup>

(1. Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Bureau of Guizhou Fanjingshan

National Nature Reserve, Tongren, Guizhou 554400, China; 3. Institute of Biology, Guizhou

Academy of Sciences, Guiyang 550009, China; 4. Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Soil physicochemical properties of different depth of Fanjingshan Mountain at different altitudes were investigated to explore the relationship between altitudes and soil physicochemical properties. The contents of soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus and available phosphorus were determined. The results showed that with the increase of depth of soil samples in different altitudes, the contents of soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and the ecological stoichiometry decreased. At the different altitudes, there was a significant correlation between elevation and the contents of soil organic matter and available nitrogen in the depth of 0—20 cm due to the factors such as climate, biological and terrain. With the increase of elevation, the contents of soil organic matter increased, then decreased. The highest value appeared at the altitude of 1 450 m. The available nitrogen increased with the increase of elevation. All indicators of the soil in the depth of 20—40 cm had no obvious correlation with elevation. The contents of soil organic matter and total nitrogen, soil C/P and N/P had a significant correlation with the elevation, they increased with the altitude rising in the soil depth of 40—60 cm.

**Keywords:** altitude; Fanjingshan Mountain; carbon; nitrogen; phosphorus; distribution

土壤碳、氮、磷是植物生长的必需元素,其分布特征影响植物的整个生长过程。海拔高度是影响土壤碳氮磷含量分布的重要因素之一,海拔高度的变化会造成气候、植物类型与土壤类型等的改变,从而影响

土壤理化性质与养分供应情况。目前已有诸多研究表明,海拔高度与土壤碳氮磷存在显著相关性。

贵州梵净山国家级自然保护区,位于贵州省东北部的江口、印江和松桃 3 县的交界之处。梵净山是武

陵山脉主峰,山体庞大,是乌江水系和沅水系的分水岭<sup>[1]</sup>。生物多样性高,植被类型多样,是一个以常绿阔叶林、落叶阔叶林为主的森林生态系统,山中生长有多种珍稀植物,如冷杉(*Abies fanjingshanensis*)、珙桐(*Davidia involucrata* Baill)、红豆杉(*Taxus wallichiana* var. *mairei*)<sup>[2-3]</sup>等,药用植物丰富,保护区及周边地区药用植物多达 460 余种(变种)<sup>[4]</sup>,还有多种野生动物,是濒危灵长类动物黔金丝猴的唯一分布地<sup>[5-6]</sup>。梵净山土壤垂直分布明显,从下至上依次为山地黄红壤、山地黄壤、山地黄棕壤、山地暗色矮林土、山地灌丛草甸土<sup>[7]</sup>。

虽然我国学者对梵净山已经做出大量研究,但过去研究者对该区的研究多集中在植物分布<sup>[8-9]</sup>与动物分布<sup>[10]</sup>等方面,鲜有针对海拔高度与土壤理化性质相关性的研究报道。探明梵净山地区土壤碳氮磷含量与海拔高度间的关系,为进一步了解梵净山国家级自然保护区的自然地理条件,保护珍稀动植物,合理利用该区自然资源,理解各生态化学计量特征,本文在梵净山海拔高度 500~2 400 m 范围内采集多个土壤样品,分析土壤碳氮磷含量,进而研究海拔高度与土壤碳氮磷的相关性,以期揭示土壤营养元素的分布特征,为梵净山的土壤背景调查、资源利用与生态保护提供基础资料与参考依据,对认识梵净山土壤养分垂直分布及其对海拔高度变化的响应具有重要的理论意义。

## 1 研究区概况

梵净山风景区位于贵州省铜仁市江口县、印江自治县、松桃自治县交界处,地理坐标为 27°46′50″—28°1′30″N, 108°35′55″—108°48′30″E,面积约 419 km<sup>2</sup>,地处我国亚热带中心,被联合国教科文组织纳为全球“人与生物圈”保护网成员单位,为中国 5 大佛教名山之一。平均气温 6~17℃,1 月均温 3.1~5.1℃,7 月均温 15~27℃,≥10℃积温 1 500~5 500℃,年降雨量 1 100~2 600 mm 左右,相对湿度平均超过 80%(迎风坡),垂直气候带谱可分为中亚热带、北亚热带、暖温带、温带 4 个气候带。最高峰凤凰山海拔 2 570.5 m,其次为金顶海拔 2 493.4 m,最低处盘溪沟海拔 500 m。土壤呈明显的垂直分布,由山顶至山麓依次为山地灌丛草甸土、山地暗色矮林土、山地黄棕壤、山地黄壤、山地黄红壤。植被类型主要有常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶林、针阔混交林和灌丛等。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

根据梵净山土壤分布特点,在确保采样点的典型

性、代表性和均匀性的基础上,采用 GPS 定位,于 2013 年 10 月在梵净山风景区内不同海拔高度处进行土壤样品采集,样地按“S”形布设 5~8 个采样点,采集土壤样品进行混合,每个样地采集 0—20 cm 土层样品,在具有代表性的样地取 20—40、40—60 cm 土层样品,每个样地采集重复样品 3 个,合计采集 0—20 cm 土层样品 75 个、20—40 cm 土层样品 42 个、40—60 cm 土层样品 30 个,共 147 个土壤样品。采集样品装入不含污染物的布袋,带回实验室风干,剔除植物残体及大砾石等非土壤物质,同时避免灰尘和酸碱等污染。风干后按对角线四分取土法分取一半样品研磨过筛,供分析测试用,另一半作为备用样品保存。

### 2.2 测定方法

土壤样品分析方法如下:土壤有机质采用高温外加热重铬酸钾氧化—容量法测定,土壤全氮采用开氏法,土壤碱解氮采用碱解扩散法,土壤全磷采用酸溶—钼锑抗比色法,土壤有效磷采用盐酸—氟化氢提取—钼锑抗比色法。

### 2.3 数据分析

试验数据首先按统计学的方法,剔除异常值采取 Grubbs 法,显著水平  $\alpha=0.05$ ,然后用 Excel 2003 统计整理,并将计算结果汇总绘制成总数据表。再对各指标数据进行计算平均值、标准偏差、误差,采用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析和多重比较。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同海拔高度土壤有机质、全氮、全磷含量分布特征

碳氮磷是植物生长的必需元素,对作物的生长发育起着至关重要的作用,由表 1 可知,随着海拔高度的变化,土壤有机质、全氮、全磷的含量也发生不同程度的变化,最大值与最小值相差甚远。就变异系数而言,各营养元素的变异系数为 18%~138%。

土壤有机质、全氮及全磷含量均随采样土层深度的增加而降低,不同土层有机质含量均值分别为 70.70、44.12、18.22 g/kg;全氮含量均值分别为 5.18、3.19、1.49 g/kg;全磷含量均值分别为 0.39、0.31、0.23 g/kg。

从图 1 可以看出,0—20 cm 与 20—40 cm 层土壤有机质含量随着海拔高度的升高而升高,并在升高至一定程度范围后,又随着海拔高度的升高而降低。40—60 cm 层土壤随海拔高度的升高而缓慢增加。经过回归分析,20—40 cm 层土壤有机质含量与海拔高度不存在显著相关性( $p=0.355$ ),0—20 cm 与 40—60 cm 层土壤有机质含量与海拔高度分别存在显著相关与极显著相关性,回归方程分别为:

$$Y_{20} = -2.7 \times 10^{-5} X^2 + 0.1070X - 17.733$$
$$(R^2 = 0.2078, p = 0.046 < 0.05)$$

$$Y_{60} = -1.7 \times 10^{-6} X^2 + 0.0163X - 2.6907$$
$$(R^2 = 0.6806, p = 0.003 < 0.01)$$

表 1 梵净山不同土层土壤主要养分特征

土层深度	测定项目	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	C/N	C/P	N/P
0—20 cm	均值	70.70	5.23	394.02	0.39	57.55	14.47	236.38	14.94
	标准差	36.09	2.58	173.55	0.17	72.55	10.05	144.68	7.98
	最大值	145.63	9.94	657.51	0.71	353.49	57.22	561.80	34.83
	最小值	6.62	1.33	27.55	0.15	6.55	4.96	31.47	4.13
	变异系数	51.04	49.35	44.05	42.55	126.07	69.43	67.86	53.47
20—40 cm	均值	44.21	3.22	250.68	0.31	25.21	12.88	170.57	12.15
	标准差	25.17	1.43	121.30	0.15	24.12	3.60	123.00	6.23
	最大值	87.55	6.26	446.82	0.59	16.16	18.16	447.52	24.79
	最小值	9.84	1.31	77.77	0.12	63.97	7.54	36.18	3.79
	变异系数	56.93	44.35	48.39	49.12	67.01	27.95	72.24	51.32
40—60 cm	均值	17.08	1.50	124.71	0.24	13.40	11.99	72.81	6.24
	标准差	8.34	0.79	73.28	0.11	15.52	2.91	33.75	2.90
	最大值	28.21	2.51	250.99	0.48	11.62	19.27	129.77	10.86
	最小值	6.13	0.46	26.87	0.13	44.31	7.99	30.33	2.56
	变异系数	48.82	52.63	58.76	43.14	74.87	24.30	46.45	46.46

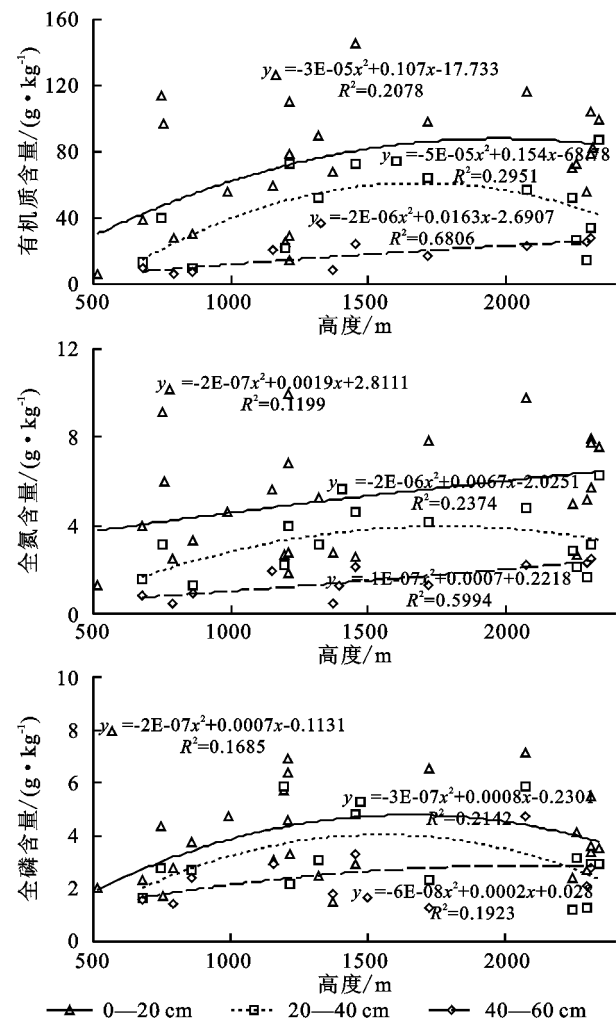


图 1 不同海拔高度下土壤碳氮磷的变化

各层土壤全氮含量均随着海拔高度的升高而平缓上升。但经过回归分析,0—20 cm 与 20—40 cm 层土壤全氮含量与海拔高度不存在显著相关性,其  $p$  值分别为 0.090,0.231;40—60 cm 层土壤有机质含量与海拔高度存在极显著相关性,回归方程如下:

$$Y_{60} = 9.4 \times 10^{-8} X^2 + 0.0007X + 0.2218$$
$$(R^2 = 0.5994, p = 0.009 < 0.01)$$

(3)

0—20 cm 与 20—40 cm 层土壤全磷含量均随着海拔高度的升高而提升,在达到一定含量后,全磷含量又随着海拔高度的升高而降低,但经回归分析,此两层土壤全磷含量与海拔高度不存在显著相关性,其  $p$  值分别为 0.405,0.866;40—60 cm 层土壤全磷含量随着海拔高度的升高而缓慢上升,回归分析表明,两者同样不存在显著相关性, $p$  值为 0.236。

3.2 不同海拔高度下碱解氮、速效磷含量分布特征

土壤碱解氮、速效磷含量与作物的生长具有密切的关系,分别能够反映土壤近期内的氮素与磷素的供应情况,可供作物近期吸收利用,是土壤肥力的直接体现。由表 1 可知,土壤碱解氮和速效磷含量均随采样土层深度的增加而降低,不同土层碱解氮含量均值分别为 394.02,250.68,124.71 mg/kg;速效磷含量均值分别为 57.55,25.21,13.40 mg/kg。

由图 2 可知,0—20 cm 层土壤碱解氮含量随着海拔高度的升高而提高,经过回归分析,两者存在极显著的相关性,其回归方程为:

$$Y_{20} = 9.5 \times 10^{-5} X^2 + 0.1492X + 373.15$$
$$(R^2 = 0.2955, p = 0.008 < 0.01)$$

(4)

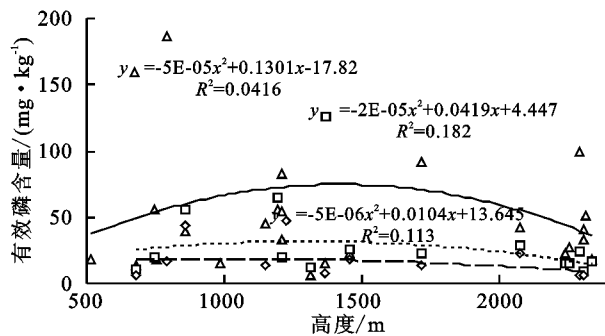
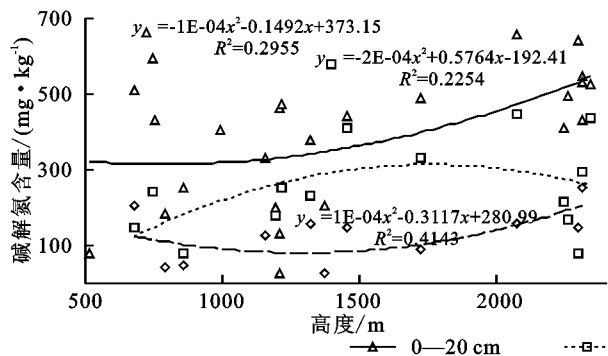


图 2 不同海拔高度下碱解氮、有效磷的变化

20—40 cm 层土壤碱解氮含量随着海拔高度的增加而提升,在到达一定含量后,又随着海拔高度的升高而降低,但经过回归分析,两者不存在显著的相关性, $p$  值为 0.268。40—60 cm 层土壤碱解氮含量先随海拔的升高而降低,在降低到一定含量后,又随着海拔的提升而升高,回归分析表明,两者亦不存在显著的相关性, $p$  值为 0.183。

0—20 cm 与 20—40 cm 层土壤有效磷含量先随着海拔高度的升高而增加,在达到一定含量后,又随着海拔高度的升高而降低,经回归分析,此两层土壤有效磷含量皆与海拔高度无明显相关关系, $p$  值分别为 0.645,0.237;40—60 cm 层土壤有效磷含量随着海拔高度的升高而缓慢降低,回归分析表明,两者无相关性,其  $p$  值为 0.381。

### 3.3 不同海拔高度下生态化学计量特征

由表 1 可知,土壤 C/N、C/P、N/P 均随采样土层深度的增加而降低,不同土层 C/N 均值分别为 14.47, 12.88, 11.99; C/P 均值分别为 236.38, 170.57, 72.81; N/P 均值分别为 14.94, 12.15, 6.24。不同深度土层土壤 C/N 变异系数为 24.30%~69.43%, C/P 变异系数为 46.45~72.24, N/P 变异系数为 46.46~53.47, 可见各土层土壤生态化学计量都存在中等程度变异。

从图 3 可以看出,各深度土层土壤 C/N 比均随着海拔高度的升高而升高,在达到一定比值后,又随着海拔高度的升高而降低,经过回归分析,各深度土层土壤 C/N 比与海拔高度无相关性, $p$  值分别为 0.451, 0.551, 0.927。

各深度土层土壤 C/P 比均随着海拔高度的升高而缓慢上升,经回归分析,0—20 cm 与 20—40 cm 层土壤 C/P 比与海拔高度无相关性, $p$  值分别为 0.518, 0.278; 40—60 cm 层则存在显著相关性,回归方程为:

$$Y_{60} = -4 \times 10^{-6} X^2 - 0.0477X + 12.898$$

$$(R^2 = 0.411, p = 0.046 < 0.05) \quad (5)$$

0—20 cm 层土壤 N/P 比随着海拔高度的升高而降低,在降低到一定程度后,又随着海拔高度的升高而提高,回归分析表明,两者无明显相关关系, $p$  值为

0.572; 20—40 cm 与 40—60 cm 层均随海拔高度的升高而平缓提高,回归分析表明,20—40 cm 层土壤 N/P 比与海拔高度无明显相关关系, $p$  值为 0.157; 40—60 cm 层则存在显著相关性,回归方程为:

$$Y_{60} = 1 \times 10^{-6} X^2 - 0.0002X + 3.7555$$

$$(R^2 = 0.4519, p = 0.036 < 0.05) \quad (6)$$

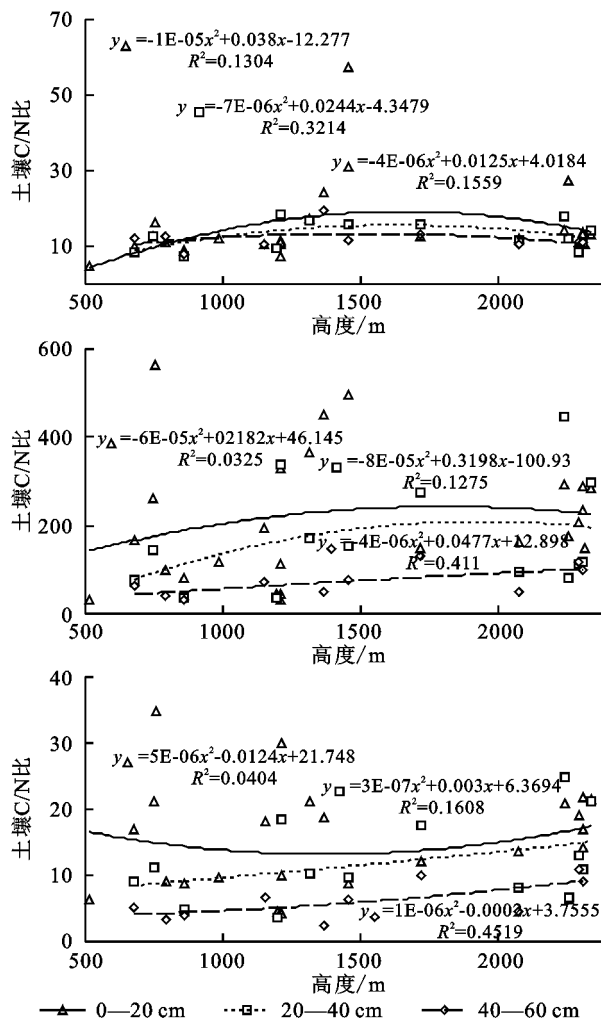


图 3 不同海拔高度下生态化学计量变化

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 不同深度土层土壤碳、氮、磷含量变化。土

壤碳、氮、磷含量及其在空间上的分布对植物生长的影响很大。梵净山地区不同深度土壤呈明显的变化规律:随着土壤深度的增加,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷以及各生态化学计量均呈降低的趋势,表层土壤各指标含量较深层土壤有数倍之差。土壤有机质、磷素、氮素主要来源于动植物及微生物残体、分泌物及排泄物,梵净山常绿阔叶、落叶阔叶混交林中,凋落物在土层表面聚集,通气状况与水热条件良好,经过微生物的作用分解,为各种元素的输入提供了便利的条件,而深层土壤各元素则多源于根系、根系分泌物及土壤微生物等,对比表层土壤,与外界的交换作用较弱,故土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷等均随着土壤深度的增加而降低。

(2) 海拔高度对碳、氮、磷含量的影响。梵净山自然保护区0—20 cm层土壤有机质含量随海拔高度的增加呈先升高后下降的趋势,在海拔1450 m达到最大值;40—60 cm层土壤有机质则随海拔高度的增加而提高,此结果与前人的研究基本一致<sup>[11]</sup>。究其原因,一方面,土壤有机质含量与温度、水分有关,梵净山高海拔区域气温低于低海拔区域,低温阻碍了土壤矿化的作用,为有机质的积累提供了条件,且梵净山高海拔区域云雾缭绕,土壤湿度较大,促进植物凋落物转化为土壤有机质;另一方面,高海拔地区的针叶与竹叶相较于低海拔地区的阔叶,难于分解,更易积累有机质,因此,表层及深层土壤有机质皆随着海拔高度的升高而升高。表层土壤较深层土壤更易受到气候的影响,在气温低于一定范围后,土壤微生物活动受到抑制,腐殖化作用变弱,土壤有机质的积累速度降低,故在海拔高度增加到一定程度后,表层土壤有机质会由上升趋势转变为下降趋势。

全磷与有效磷含量与海拔高度相关性不明显;40—60 cm层土壤全氮含量、0—20 cm层土壤碱解氮含量变化规律与土壤有机质相似,随海拔高度的升高而缓慢上升。土壤各种营养元素受有机质含量的影响较大,土壤全氮、碱解氮含量主要受到有机质分解与植物生长消耗所影响,通常在分解缓慢的情况下,土壤全氮、碱解氮含量较高。梵净山高海拔地区较潮湿,且温度较低,产生了嫌气条件,微生物不易活动,土壤有机质难于分解,从而导致土壤全氮、碱解氮含量随海拔高度的上升而增加。

(3) 海拔高度对土壤碳、氮、磷比的影响。本研究结果表明,梵净山不同深度土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比变化范围分别为11.99~14.47,72.81~236.38,6.24~14.94,高于中国陆地土壤的平均值(中国陆地土壤C/N, C/P, N/P的平均值为12.3, 52.7, 3.9)<sup>[12]</sup>。

40—60 cm层土壤碳磷比与氮磷比均随海拔高度的上升而缓慢增加。土壤碳氮含量在空间分布上能够保持一致性,两者虽然变化差异较大,但碳氮比受气候和环境影响较小。通过相关性分析表明,梵净山自然保护区土壤有机质与全氮存在极显著的正相关性( $r=0.832$ ),因此土壤碳氮比随海拔高度的升高无明显变化,这与Tian等<sup>[12]</sup>对全国土壤碳氮磷含量的研究结果大致相同。而土壤碳磷比和氮磷比受区域水热条件和成土作用特征影响较大,由于气候、地貌、植被、母岩、时间、土壤动物等土壤形成因子和人类活动的影响,土壤碳氮磷总量变化很大,使得土壤的空间变异性较大。土壤全磷与全氮、有机质分别存在极显著与显著正相关,但是相关系数较小,分别为0.467, 0.297, 因此土壤的碳磷比与氮磷比随海拔高度变化差异较大,均随海拔高度的上升而增加。土壤的碳磷比与氮磷比受海拔高度的影响主要是由于水热条件变化而引起。气温随海拔高度的增加而降低,从而影响土壤与生物的形成,两者间的相互作用可对土壤养分的分布产生影响。高海拔地区气温较低,雾多潮湿,致使磷的淋溶作用强烈,不利于磷的积累,相对低海拔地区磷素含量较低,而植物生长茂盛,地表植被丰厚,从而促进土壤碳氮积累,因此,梵净山自然保护区土壤碳磷比与氮磷比随着海拔高度的上升而有所增加。

总而言之,梵净山自然保护区不同海拔高度下土壤理化性质存在明显差异,气候、生物与地形等因素对土壤性状有明显的影响作用。研究结果与贵州其他自然保护区的研究结果基本一致,较于贵州望谟苏铁、黎平太平山自然保护区的研究结果<sup>[13-14]</sup>,3个地区土壤有机质、氮素含量均随海拔高度的上升而提高,且随土层深度的升高而降低,有着相同的规律。以有机形式或其他稳定形式存在的营养元素含量在不同海拔高度下能以一定的规律变化,而易淋溶的营养元素含量则无明显的规律性。研究海拔与土壤养分的相关性,可了解梵净山土壤养分的垂直分布特性,为调查梵净山珍稀植物生长条件及其生态环境保护提供理论支持,并解释海拔高度对土壤养分的影响,建议在以后的研究中对不同海拔高度下土壤养分含量进行长期定点调查,并与植被类型分布相结合,针对土壤养分变化与植物生长状况,制定适宜的珍稀植物保护方案,维持梵净山生态环境的多样性。

## 4.2 结论

(1) 梵净山自然保护区不同深度土壤碳、氮、磷含量差异较大,其分布规律:随着土壤深度的增加,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷含量以及碳氮比、氮磷比、碳磷比等生态化学计量均呈降低的趋势。

(2) 土壤全磷、有效磷含量均与海拔高度不相关, 0—20 cm 层土壤中, 土壤有机质、碱解氮与海拔高度显著相关, 有机质随海拔的增加呈先提高后下降的趋势, 在海拔 1 450 m 达到最大值, 碱解氮随海拔的增加而增加; 20—40 cm 层土壤各项指标与海拔高度不相关; 40—60 cm 层土壤中, 有机质、全氮含量与海拔高度显著相关, 均随海拔的增加而增加。

(3) 0—20, 20—40 cm 层土壤各生态化学计量指标均与海拔高度无明显相关关系, 40—60 cm 层土壤碳磷比、氮磷比与海拔高度显著相关, 均随海拔的增加而增加。

#### 参考文献:

- [1] 王铮, 王莹, 李山, 等. 贵州省旅游业区位重构研究[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 313-323.
  - [2] 吴明开, 沈志君, 刘海, 等. 梵净山自然保护区珙桐天然种群生命表与生存分析[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1419-1424.
  - [3] 李晓笑, 王清春, 崔国发, 等. 濒危植物梵净山冷杉野生种群结构及动态特征[J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1479-1486.
  - [4] 鲁道旺, 宋邦喜, 吴仕国, 等. 梵净山药用植物初步调查及保护策略[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18): 144-148.
  - [5] 牛克锋, 崔多英, 石磊, 等. 黔金丝猴(*Rhinopithecus brelichi*)雪季地表食物利用[J]. 野生动物学报, 2014, 35(1): 31-37.
  - [6] 杨海龙, 李迪强, 朵海瑞, 等. 梵净山国家级自然保护区植被分布与黔金丝猴生境选择[J]. 林业科学研究, 2010(3): 393-398.
  - [7] 张玉武, 杨红萍. 贵州梵净山生物圈保护区藤本植物资源特点[J]. 贵州科学, 2003, 21(3): 75-80.
  - [8] 朱映安, 和加卫, 杨正松, 等. 贵州梵净山自然保护区悬钩子属植物资源考察及开发利用[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9): 504-508.
  - [9] 廖雯, 左经会. 贵州梵净山国家自然保护区药用种子植物区系研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 1503-1504.
  - [10] 刘高峰, 杨茂发. 贵州梵净山自然保护区土壤甲螨群落季节动态[J]. 动物学杂志, 2013, 48(1): 58-64.
  - [11] 张凤海, 张明. 梵净山土壤研究报告[C]//梵净山科学考察集编辑委员会. 梵净山科学考察集. 贵阳: 贵州省环境保护局, 贵州省环境科学学会, 1982.
  - [12] Tian H, Chen G, 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(1/3): 139-151.
  - [13] 何腾兵, 朱军, 杨柳, 等. 贵州望漠苏铁自然保护区土壤研究[C]//罗扬, 刘浪. 贵州望漠苏铁自然保护区科学考察集. 贵阳: 贵州科技出版社, 2010.
  - [14] 何腾兵, 朱军, 涂成龙, 等. 黎平太平山自然保护区土壤研究[C]//张华海, 李明晶, 邓锦光. 黎平太平山自然保护区综合科学考察集. 贵阳: 贵州科技出版社, 2006.
- ~~~~~
- (上接第5页)
- [4] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996.
  - [5] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
  - [6] 黄冠华, 詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 55-60.
  - [7] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 62-166.
  - [8] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
  - [9] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 赵坤. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 74-78.
  - [10] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 35-41.
  - [11] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析: 以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
  - [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
  - [13] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 281-288.
  - [14] 黄自立, 张文孝. 陕北黄绵土的性质与改良利用[J]. 土壤通报, 1987(3): 108-110.
  - [15] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
  - [16] 孙彩丽, 薛莲, 刘国彬, 等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 550-561.
  - [17] 张超, 刘国彬, 薛莲, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 507-515.
  - [18] 丁敏, 庞奖励, 刘云霞, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤颗粒体积分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 161-165.
  - [19] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 75-82.
  - [20] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 112-115.