

DOI: 10.5846/stxb201405060892

张广帅, 邓浩俊, 杜锬, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 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): - .

Zhang G S, Deng H j, Du K, Lin Y M, Ma R F, Yu W, Wang D J, Wu C Z, Hong W. 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. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

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

张广帅^{1,2}, 邓浩俊^{1,2}, 杜 锬^{1,2}, 林勇明^{1,2,*}, 马瑞丰¹, 俞 伟¹, 王道杰³,
吴承祯^{1,2,4}, 洪 伟^{1,2}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建省高校森林生态系统经营与过程重点实验室, 福州 350002

3 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

4 武夷学院, 南平 354300

摘要:为了探究泥石流频发区不同海拔梯度土壤的化学计量特征, 阐明土壤性质对海拔变化的响应规律, 进而有效指导受限性生态脆弱区生态系统的保护和恢复, 在云南省小江流域支流阿旺小河西北侧山地选取了 1500—2000m、2000—2500m、2500—3000m 三个海拔梯度, 测定各海拔梯度范围内 0—10cm、10—20cm、20—30cm 土壤的有机碳、全氮、全磷、全钾含量及其机械组成, 分析了不同海拔梯度土壤化学计量比的垂直分布特征及其与植被区、土壤物理结构的关系。结果表明: 随着海拔梯度的升高, 土壤有机碳和全氮含量以及碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比均呈升高趋势, 全磷和全钾含量以及磷钾比呈降低趋势, 且有机碳、全氮、全磷和全钾对海拔的敏感程度依次降低; 不同海拔梯度之间, 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾及其化学计量比的垂直分布存在显著差异性, 即随着土壤深度的增加, 有机碳和全氮含量呈降低趋势, 而全磷和全钾含量以及各化学计量比变化规律不明显; 同一海拔梯度内, 森林植被区和灌草丛群落植被区土壤生态化学计量比差异性不大, 且随海拔梯度变化一致, 灌草丛群落中, 土壤碳氮比与地上植被盖度具有极显著正相关性, 森林群落植被区, 土壤磷钾比与优势乔木种平均高度具有极显著负相关性, 而与平均胸径呈显著负相关性; 土壤物理结构的分异是造成土壤化学计量特征发生变化的主要内在原因, 土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比随着含水率和砂粒的增加呈指数型上升而随着粘粒的增加呈指数型下降的趋势。

关键词: 泥石流频发区; 海拔梯度; 化学计量特征; 土壤物理结构

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

ZHANG Guangshuai^{1,2}, DENG Haojun^{1,2}, Du Kun^{1,2}, LIN Yongming^{1,2,*}, MA Ruifeng¹, YU Wei^{1,2}, WANG Daojie³, WU Chengzhen^{1,2,4}, HONG Wei^{1,2}

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China

3 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China

4 Wuyi University, Nanping 354300, China

基金项目: 福建农林大学林学院青年科研基金项目 (6112C039Q); 国家自然科学基金项目 (41201564); 国家科技支撑计划专题 (2012BAC06B02-02)

收稿日期: 2014-05-06; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: monkey1422@163.com

Abstract: To understand soil stoichiometric characteristics at different elevations in a mountainous area with high frequency debris flows, organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), and mechanical characteristics of soil from 3 elevational bands (1500—2000, 2000—2500, 2500—3000 m) were measured at different soil depths. This study also analyzed vertical variations in soil stoichiometric characteristics in these elevational gradients and its correlation with soil physical structure. SOC, TN, C:P, C:K, N:P, and N:K were positively correlated with elevation, while TP, TK, and P:K were negatively correlated with elevation. SOC had the strongest relationship with elevation, followed by total N, P, and K. The vertical distribution of SOC, TN, TP, TK, and stoichiometric ratio varied with elevation. SOC and TN decreased with soil depth, but there was no clear relationship with TP, TK, or stoichiometric ratio. Within each elevational band, soil stoichiometric characteristics did not differ significantly between forest communities and shrub-meadow communities; both presented the same pattern as the elevation changed. In the shrub-meadow community, C:N was significantly correlated with above ground vegetation cover. In the forest community, P:K was significantly correlated with mean tree height. Differences in soil physical structure were the key factor linked to changes in soil stoichiometric characteristics. C:P, C:K, N:P, and N:K had a positive exponential relationship with soil water content and sand content, and a negative exponential relationship with clay content.

Key Words: Area with high frequency debris flow; elevation gradient; stoichiometry characteristic; soil physical structure

土壤养分是影响生态系统结构和功能的关键性因素, 直接决定地上有机体生长、植被群落的结构、生产力水平高低和生态系统的稳定性^[1-2]。土壤生态化学计量比是反映土壤内部碳氮磷等循环的主要指标, 综合了生态系统功能的变异性, 易于测量且有助于确定生态过程对全球气候变化的响应^[3]。土壤生态化学计量学在国外起步较早, 可追溯到 20 世纪 50 年代, 20 世纪 90 年代以来发展迅速且逐步成熟^[4-5]。自 2005 年曾德慧和陈广生首次在国内系统介绍了生态化学计量学的基本理论, 随后国内学者陆续开展各种生态系统生态化学计量方面的研究, 如刘万德等对云南普洱季风常绿阔叶林演替系列的土壤植被系统进行了 C、N、P 化学计量特征研究^[6], 丁小慧等对呼伦贝尔草地植物群落进行了化学计量特征研究^[7], 目前国内相关研究主要集中在: (1) 不同优势物种和土壤的化学计量特征^[8-9]; (2) 不同演替阶段土壤-植被系统的化学计量特征^[10-11]; (3) 不同生态系统土壤-植被系统的化学计量特征^[12]; (4) 施肥作用下土壤-植被系统的化学计量特征^[13]。泥石流频发区作为一类典型的受限性生态脆弱区, 其土壤碳氮磷平衡性较差, 对区域环境变化响应敏感, 土壤-植被系统退化严重, 对其土壤生态化学计量特征的研究可加深生态脆弱区生态系统功能变化、系统维持机制及演变特征等方面的认识。

云南金沙江一级支流小江流域山地海拔最高达 4016 m, 最低为 691 m, 相对高差达 3000 多 m, 作为干热河谷的典型流域, 区域内泥石流灾害活动强烈, 流域两侧山体及植被破坏严重, 土壤正常的分布规律受到严重制约且土壤侵蚀严重。长期以来人们对小江流域两侧山地的研究主要涉及土壤侵蚀^[14-15]、景观格局演变^[16]、泥石流滩地利用^[17]、植被恢复技术^[18]等方面, 而对其土壤化学计量特征的研究鲜见报道, 长期受山地灾害限制下土壤性质的响应特征尚不明了, 难以科学有效地指导受限性脆弱生态区土壤-植被系统的保护与恢复重建工作。本课题组前期已对小江流域泥石流频发区山地植被的土壤环境梯度及其相互关系进行了报道^[19], 有鉴于此, 本文选择泥石流频发区典型流域小江流域为研究区, 在该流域内沿海拔梯度设置样地, 探讨土壤生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律, 以期对山地脆弱生态系统资源的合理利用和生态恢复提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

小江流域(102°52'—103°22'E, 25°32'—26°35'N)为金沙江一级支流, 发源于滇东北高原鱼味后山, 自南

向北流经云南寻甸县、昆明市东川区及会泽县境,全长 138.2 km,流域面积 3043.45 km²。小江河谷发育在小江深大断裂带上,属深切割造型河谷,新老构造错综复杂,新构造运动强烈,河谷两侧地形陡峻,地面高差悬殊,最高海拔 4016 m,最低海拔 691 m。受地形条件的制约,本区气候类型复杂,垂直地带性分异明显,年平均气温 17—19 ℃,年平均日较差 8 ℃—9.5 ℃,≥10 ℃的年活动积温 5100 ℃—6500 ℃,年平均降雨量 740—810 mm,年蒸发量为 3000 mm,干燥指数为 2.49—2.02,干湿季节分明,雨季(5—11 月)降雨量占全年总降雨量的 80%以上,年平均日照时数 2236 h,夏季日照时数 470 h,占全年日照时数的 21%,冬春日照长。小江河谷按海拔高程可分为四个不同气候带,即河谷半干旱亚热带(海拔 900—1500 m)、中山下部干湿交替中、北亚热带(海拔 1500—2000 m)、中山半湿润暖温带(2000—2500 m)和寒温带湿润山地区(海拔 2500—3000 m 及以上山区)^[20]。

1.2 野外调查与取样

调查于 2013 年 7—9 月进行。在小江流域支流阿旺小河西北侧山地,沿海拔梯度(海拔范围 1500—3000 m)选择 3 个样带从低到高设置典型乔木和灌草丛样方,其中样带 1 的起始海拔为 1500 m,终止海拔为 2949 m,共设置 7 个样方(包括 4 个灌草丛样方和 3 个乔木样方);样带 2 的起始海拔为 1591 m,终止海拔为 2952 m,同样设置 7 个样方(包括 4 个灌草丛样方和 3 个乔木样方);样带 3 的起始海拔为 1549 m,终止海拔为 3000 m,也设置了 7 个样方(包括 4 个灌草丛样方和 3 个乔木样方)。乔木样方面积为 20m×20m,灌草丛样方为 2m×2m^[21]。样带设置包含三个海拔范围,在 1500—2000 m(梯度 I)、2000—2500 m(梯度 II)、2500—3000 m(梯度 III)范围内各设置 7 个样方,样方的设置尽可能代表每个海拔梯度的整体情况。用手持 GPS500 测定每个调查样方的海拔,并用地质罗盘仪测量坡度。在每个样方内,用环刀法分别对 0—10 cm、10—20cm、20—30cm 的土壤进行 3 点重复取样,其中 1 个取样点在样方中心位置,另外 2 个取样点分别位于样方中心点与左右两侧连线的中心位置,混合后密封,带回实验室测定。

表 1 样地概况

Table 1 Sample plot survey

海拔梯度/m Elevation gradient	土壤类型 Soil type	优势群落类型 Vegetation type	
		灌草丛群落 Shrub-grassland community	乔木群落 Arbor community
2500—3000	高山草甸土、暗棕壤、棕壤	鹅绒委陵菜-扭黄茅群落 <i>Potentilla anserine-Heteropogon contortus</i>	高山针叶林
2000—2500	黄棕壤、红棕壤	酢浆草-牛尾蒿群落 <i>Oxalis corniculata-Artemisia dubia</i>	亚高山针叶混交林
1500—2000	红壤、山地黄壤	苞茅-紫茎泽兰群落 <i>Hyparrhenia bracteata-Eupatorium adenophorum</i>	中低山阔叶林

1.3 样品处理及测定

土壤容重用环刀法测定;土壤含水量用烘干法测定;土壤孔隙度采用公式(1)计算;过 2mm 筛后在中国科学院东川泥石流定位观测研究站采用马尔文激光粒度仪测定土壤机械组成,土壤粒级划分标准选用美国制(USDA)粒级划分标准;化学性质参照土壤理化分析^[21-22]进行,过 0.149 mm 筛后,测有机碳全氮、全磷、全钾。其中土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮含量采用半微量-凯氏法测定;全磷含量采用碱熔-钼锑抗显色法测定;全钾含量采用碱熔-火焰光度法测定。对每一样品进行 3 次重复测定,取其平均值为最终测定结果。

$$\text{土壤总孔隙度} = (1 - \text{土壤容重} / \text{土壤比重}) \times 100\% \quad (1)$$

1.4 数据处理与分析

数据用 EXCEL2007 建库作图,对不同海拔梯度及土壤深度之间土壤养分含量、物理结构和生态化学计量比进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 LSD 多重比较,运用皮尔逊(Pearson)相关分析对海拔梯度、土壤理化、灌丛群落地上盖度以及森林群落主要生理指标和生态化学计量比进行相关性分析,运用回归分析研

究土壤生态化学计量比随海拔梯度以及土壤物理结构的变化趋势。以上数据分析均在 SPSS19.0 中进行。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量与物理结构

对不同海拔梯度每个样本点土壤有机碳、全氮、全磷、全钾 3 次测定的平均值进行比较分析可知,在海拔由低到高上升过程中,0—30cm 土壤的有机碳、全氮含量逐渐升高,表现为 III>II>I,而土壤全磷和全钾含量则逐渐降低,表现为 I>II>III(表 2)。从海拔梯度 I 到 II,土壤有机碳和全氮分别升高了 29.67%和 31.79%,而土壤全磷和全钾分别降低了 28.38%和 35.83%;从海拔梯度 II 到 III,土壤有机碳和全氮分别升高了 72.15%和 45.73%,而土壤全磷和全钾分别降低了 37.74%和 5.08%。这表明在海拔梯度升高的过程中,0—30cm 土壤有机碳和全氮增加的程度以及土壤全磷降低的程度逐渐增大,而土壤全钾含量降低的程度则随着海拔升高逐渐减小。

表 2 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量(g/kg)(N=21)

海拔梯度 Elevation gradient	有机碳 Organic C	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
I	27.17±4.56b	1.51±0.40b	2.22±0.94a	3.07±1.88a
II	35.23±14.91b	1.99±0.76b	1.59±0.73ab	1.97±0.53a
III	60.65±19.28a	2.90±0.89a	0.99±0.36b	1.87±0.40a

同列不同字母表示差异性显著($P<0.05$)下同

海拔升高过程中不同深度土壤有机碳、全氮含量均呈现出递增的趋势,而土壤全磷和全钾则呈现出递减的趋势(图 1)。随着海拔的升高,不同深度土壤养分含量的垂直分布明显不同,海拔梯度在 I 范围内,土壤有

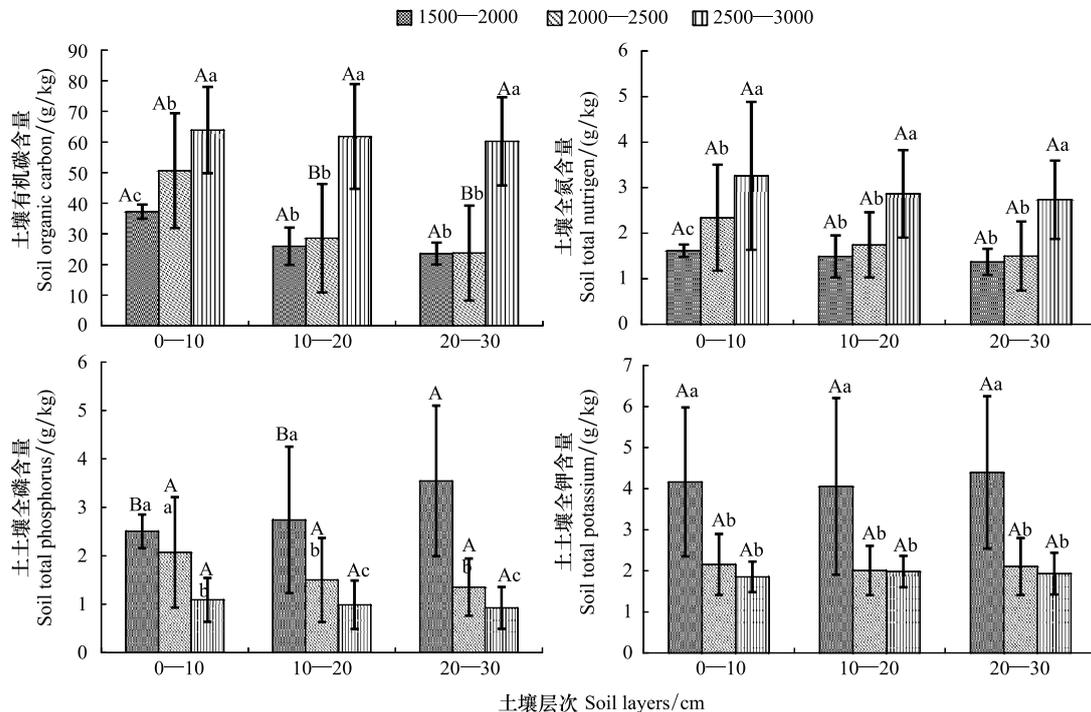


图 1 不同深度土壤的有机碳、全氮、全磷、全钾含量(N=21)

Fig. 1 Content of organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) in soil with different depth (N=21)

不同大写字母表示相同海拔梯度不同土壤深度间在 0.05 水平上具有显著差异,不同小写字母表示相同土壤深度不同海拔梯度间在 0.05 水平上具有显著差异($P<0.05$)

机碳、全氮含量均随着深度的增加而减少,土壤全磷含量则随着深度的增加而增加,土壤全钾含量相对保持稳定;海拔梯度在 II 范围内,土壤有机碳、全氮、全磷含量均随着深度的增加而减少,土壤全钾含量同样较为稳定;海拔梯度在 III 范围内,土壤有机碳、全氮、全磷均略有降低但相对变幅不大,而土壤全钾含量基本保持不变。

对不同海拔梯度各样本点土壤物理性质三次测定的平均值比较分析可知,土壤的物理结构中,0—30cm 土壤的含水率、孔隙度和砂粒含量均随着海拔的升高而升高,土壤黏粒含量和粉粒含量则与之相反,土壤容重表现为 II>I>III。综合土壤养分含量和物理结构方差分析结果可知除了全钾,I 和 II 两个海拔梯度之间土壤养分和物理结构差异性不显著,而其与 III 土壤的养分含量和物理结构的差异性显著。

表 3 土壤物理结构(N=21)

Table 3 Soil physical properties (N=21)

海拔梯度 Elevation gradient	容重/g/cm ³ Volume-weight	含水率 Water content	孔隙度 Porosity	粘粒 Clay	粉粒 Particle	砂粒 Sand
				%		
I	1.98±0.21a	0.22±0.13a	0.63±0.08a	8.30±1.04a	61.18±4.39a	30.51±4.63a
II	2.00±0.14a	0.29±0.11a	0.67±0.05a	6.79±1.37b	56.67±4.29a	37.00±5.08a
III	1.50±0.11b	0.47±0.09b	0.74±0.04b	3.38±0.89c	3.38±5.39b	53.90±5.98b

2.2 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾的生态化学计量特征

根据每个样本点 3 次测定值所得生态化学计量比的平均值可知,海拔升高的过程中,0—30cm 土壤的碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比呈升高的趋势,磷钾比呈降低的趋势,而碳氮比变化不明显。各化学计量比在 I 和 II 间均无显著差异,而碳氮比、碳钾比、氮钾比和磷钾比在 II 和 III 之间无显著差异。从 I 到 II,土壤的碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比分别升高了 96.31%、66.18%、107.79%、63.38%,而磷钾比降低了 1.15%;从 II 到 III,土壤的碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比分别升高了 155.52%、68.41%、104.36%、43.10%,而磷钾比降低了 36.05%。

表 4 土壤化学计量特征(N=21)

Table 4 Soil stoichiometry characteristics (N=21)

海拔梯度 Elevation gradient	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K
I	19.51±5.71a	14.35±5.89a	12.42±6.78a	0.77±0.26a	0.71±0.40a	0.87±0.28a
II	18.12±4.79a	28.17±15.14a	20.64±12.85ab	1.60±1.18a	1.16±0.67ab	0.86±0.47a
III	21.30±3.78a	71.98±28.65b	34.76±16.49b	3.27±1.45b	1.66±0.76b	0.55±0.19a

海拔升高过程中,不同深度土壤的碳氮比变化规律不明显,而碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比呈现升高的趋势(图 2)。另外随着海拔梯度由低到高,不同深度土壤的碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比和磷钾比的垂直分布明显不同。海拔梯度在 I 范围内,土壤碳氮比随着土壤深度增加先增加后减小,土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比随着土壤深度增加递减,土壤磷钾比随着土壤深度增加则呈增加趋势;海拔梯度在 II 范围内土壤碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮钾比和磷钾比均随着土壤深度递减,而氮磷比随着土壤深度的增加基本保持不变;海拔梯度在 III 范围内土壤碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比均随土壤深度增加呈先升高后降低的趋势,而氮钾比和磷钾比则表现为基本不变或略有降低。

对土壤各养分含量、化学计量比、土壤物理结构以及海拔高度进行相关性分析(表 5)。土壤碳磷比与海拔、有机碳、全氮、含水率、孔隙度、砂粒呈极显著正相关,而与全磷、粉粒、粘粒呈极显著负相关;土壤碳钾比与海拔、有机碳、全氮、含水率和砂粒呈极显著正相关,与孔隙度呈显著正相关,而与全磷、全钾、粘粒呈极显著负相关,与粉粒呈显著负相关;土壤氮磷比与海拔、有机碳、全氮、含水率、孔隙度、砂粒呈极显著正相关,而与全磷、粘粒和粉粒呈极显著负相关;土壤氮钾比与海拔、有机碳、全氮、含水率呈极显著正相关,与孔隙度和砂粒

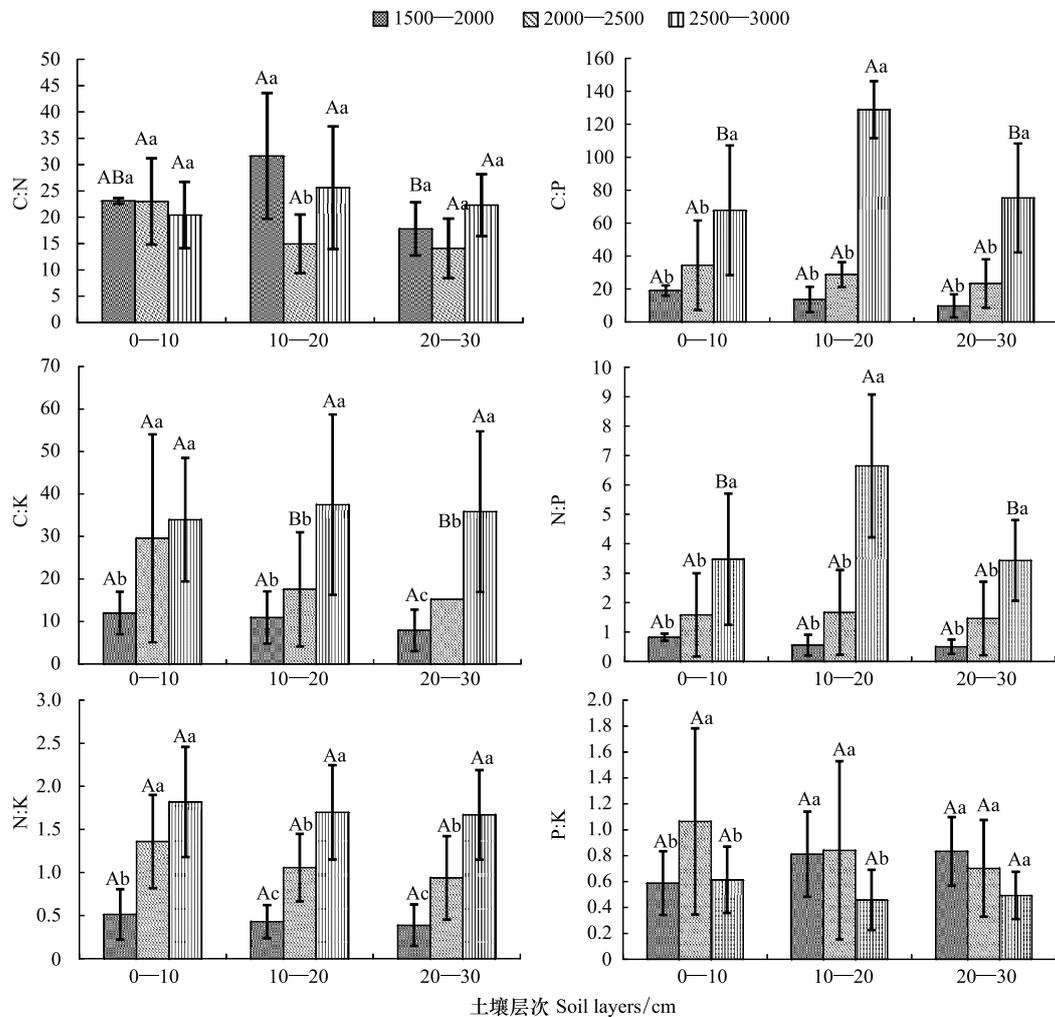


图2 不同深度土壤化学计量特征 (N=21)

Fig. 2 Ratio of C:N, C:P, C:K, N:P, N:K, P:K in soil with different depth (N=21)

呈显著正相关,而与全钾和粘粒呈极显著负相关,与全磷呈显著负相关;土壤磷钾比与全磷呈极显著正相关,与粘粒含量呈显著正相关;土壤碳氮比只与粘粒呈显著负相关。

2.3 不同植被区土壤生态化学计量特征

对不同海拔梯度内的森林和灌草丛群落下土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量进行比较(图3),2种植被区内土壤的有机碳和全氮含量均随着海拔梯度的升高而增加,同一海拔梯度内森林区和灌草丛区的有机碳和全氮含量无显著差异。森林区的全磷和全钾含量呈随海拔梯度升高而减小的趋势,灌草区的全磷和全钾含量变化无明显规律。图4所示为不同海拔梯度森林群落区和灌草丛群落区土壤生态化学计量比变化,2种植被群落类型区随海拔梯度的变化一致,同一海拔梯度内森林区和灌草丛区之间的土壤各生态化学计量比差异不显著。

对3个海拔梯度内12个灌草丛群落的土壤生态化学计量比和植被盖度进行皮尔逊相关分析(表6),碳氮比与植被盖度具有极显著正相关性,而其它各生态化学计量比与植被盖度相关性不显著。

对3个海拔梯度内9个森林群落区主要优势乔木的平均盖度、平均胸径和土壤生态化学计量比进行皮尔逊相关分析(表7),磷钾比与平均高度具有极显著负相关性,与平均胸径具有显著正相关性,而其它各生态化学计量比与平均树高和平均胸径均无显著相关性。

表 5 土壤化学计量特征与土壤理化相关性分析 (N=21)
Table 5 Correlational analyses of Soil stoichiometry characteristic and chemical-physical properties (N=21)

项目 Item	海拔 Elevation	SOC	TN	TP	TK	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K	含水率 Water content	孔隙度 Porosity	粘粒 Clay	粉粒 Particle	砂粒 Sand	
海拔 Elevation	1.000																
SOC	0.691**	1.000															
TN	0.677**	0.857**	1.000														
TP	-0.614**	-0.506*	-0.402	1.000													
TK	-0.54**	-0.310	-0.380	0.492*	1.000												
C:N	0.092	0.363	-0.139	-0.264	0.069	1.000											
C:P	0.684**	0.873**	0.669**	-0.662**	-0.324	0.405	1.000										
C:K	0.647**	0.904**	0.817**	-0.539**	-0.549**	0.250	0.820**	1.000									
N:P	0.717**	0.857**	0.784**	-0.683**	-0.392	0.192	0.960**	0.857**	1.000								
N:K	0.622**	0.787**	0.893**	-0.464*	-0.602**	-0.093	0.679**	0.932**	0.806**	1.000							
P:K	-0.289	-0.353	-0.186	0.655**	-0.274	-0.359	-0.490*	-0.183	-0.469*	-0.059	1.000						
含水率 Water content	0.791**	0.812**	0.758**	-0.586**	-0.664**	0.157	0.809**	0.845**	0.823**	0.797**	-0.100	1.000					
孔隙度 Porosity	0.662**	0.479*	0.391	-0.634**	-0.568**	0.137	0.584**	0.494*	0.548**	0.419*	-0.196	0.736**	1.000				
粘粒 Clay	-0.832**	-0.848**	-0.660**	0.584**	0.385	-0.479*	-0.803**	-0.739**	-0.753**	-0.593**	0.420*	-0.754**	-0.591**	1.000			
粉粒 Particle	-0.782**	-0.751**	-0.618**	0.428*	0.124	-0.345	-0.673**	-0.522*	-0.624**	-0.404	0.398	-0.668**	-0.467*	0.845**	1.000		
砂粒 Sand	0.812**	0.791**	0.643**	-0.472*	-0.181	0.382	0.718**	0.580**	0.667**	0.454*	-0.413	0.703**	0.505*	-0.899**	-0.994**	1.000	

* 表示相关程度达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示相关程度达到极显著水平 ($P < 0.01$) * means significant correlation at 0.05 level, ** means highly significant correlation at 0.01 level

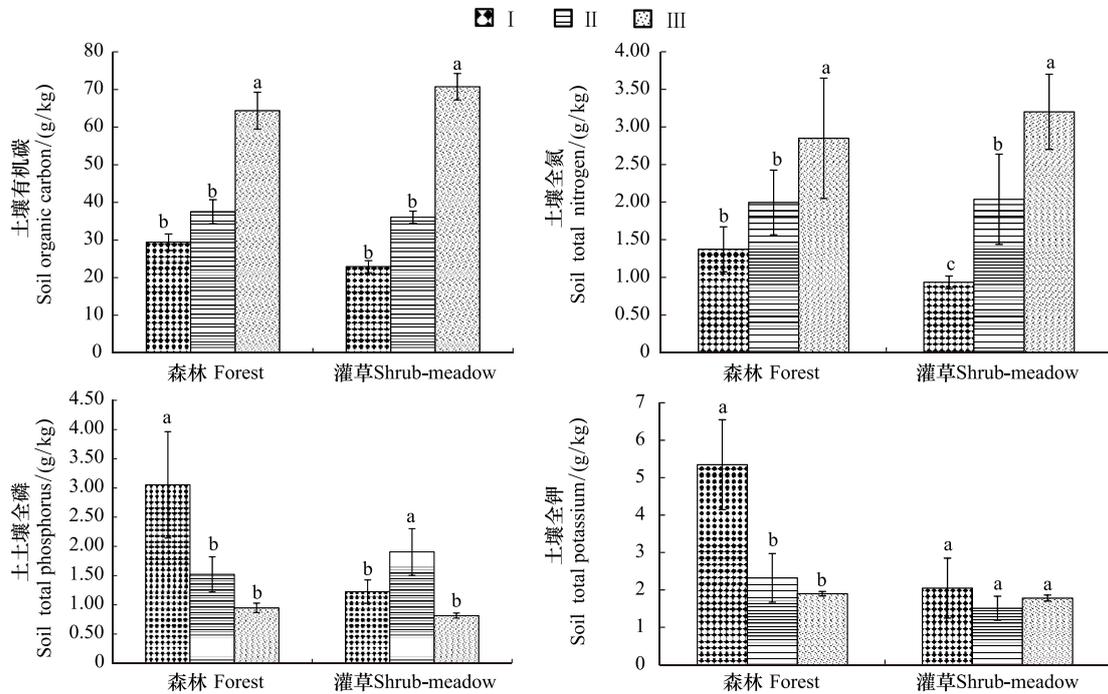


图3 不同植被区土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量

Fig. 3 Contents of soil organic carbon, total nitrogen, phosphorus and potassium under different vegetation area

不同小写字母表示不同海拔梯度间在 0.05 水平上具有显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

表6 土壤化学计量特征与灌草丛群落区盖度相关性分析 ($N=12$)

Table 6 Correlational analyses of Soil stoichiometry characteristic and coverage in Shrub-meadow region ($N=12$)

化学计量比 Stoichiometric ratio	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K
盖度 Coverage	0.995 **	0.477	0.455	0.593	0.449	0.536

** 表示相关程度达到极显著水平 ($P < 0.01$) ** means highly significant correlation at 0.01 level

表7 土壤化学计量特征与森林群落区生长指标的相关性分析 ($N=9$)

Table 7 Correlational analyses of Soil stoichiometry characteristic and physiological indexes (mean height, average diameter at breast height) in Forestry region ($N=9$)

化学计量比 Stoichiometric ratio	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K
平均高度 Mean height	0.214	-0.103	-0.207	-0.246	-0.396	-0.898 **
平均胸径 Average diameter at breast height	0.509	0.49	0.425	0.208	0.166	-0.772 *

* 表示相关程度达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示相关程度达到极显著水平 ($P < 0.01$)

2.4 土壤生态化学计量特征与海拔的关系

相关性分析可知(表5),土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比与海拔高度呈极显著正相关,而碳氮比和磷钾比与海拔相关性不显著。对不同深度的土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比与海拔进行回归分析(图5),土壤0—10cm、10—20cm、20—30cm处的碳氮比、碳钾比、氮磷比和氮钾比均随着海拔梯度的升高呈指数型上升($P < 0.05$)。土壤深度在0—10cm,碳氮比、碳钾比、氮磷比和氮钾比进行指数拟合的F值分别为35.834、28.595、31.922、22.817, P 值均小于0.01;土壤深度在10—20cm,碳氮比、碳钾比、氮磷比和氮钾比进行指数拟合的F值分别为38.092、65.166、40.584、35.356, P 值均小于0.01;土壤深度在20—30cm,碳氮比、碳钾比、氮磷比和氮钾比进行指数拟合的F值分别为12.997、19.240、24.560和13.633, P 值分别为0.03、0.01、0.001和0.02。

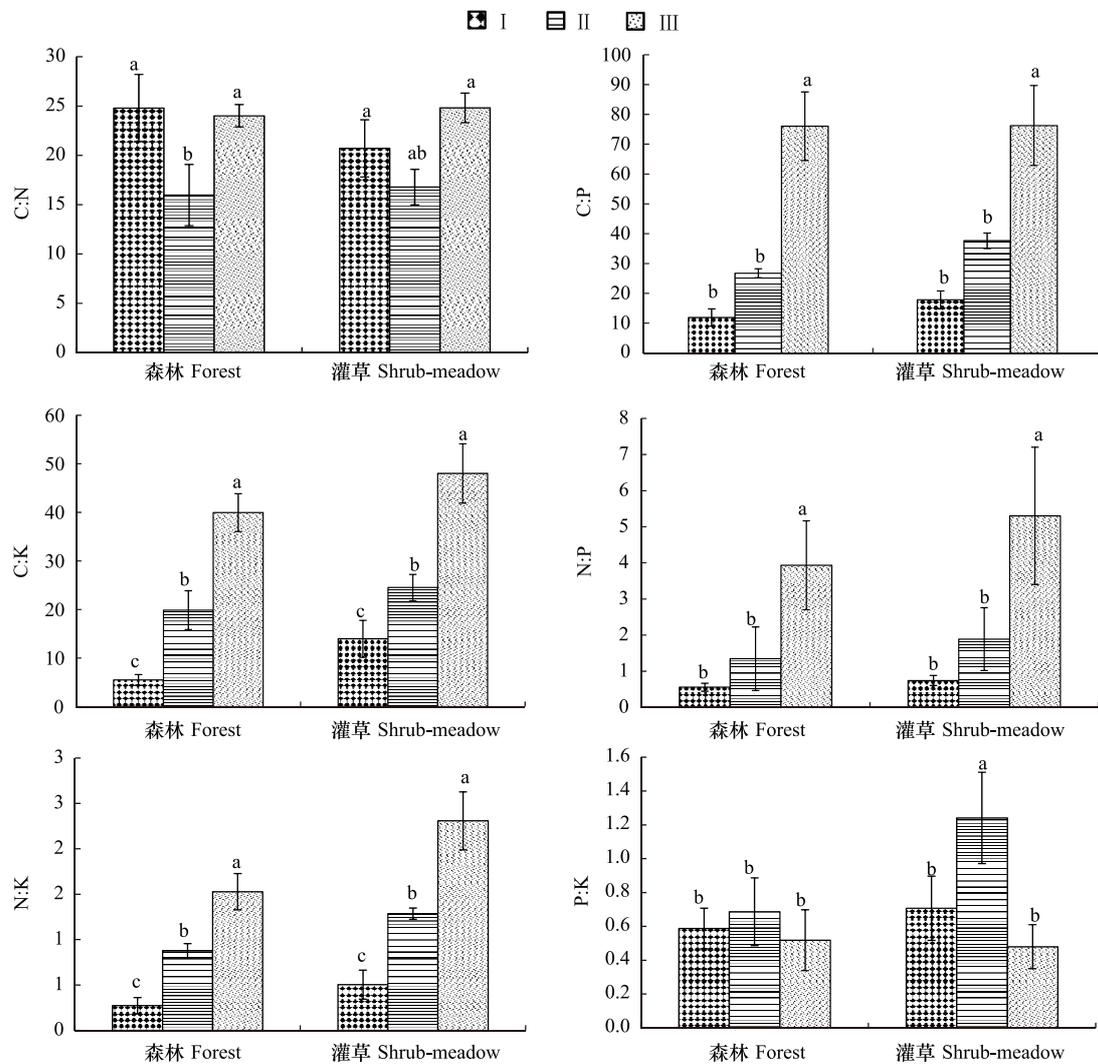


图 4 不同植被区土壤生态化学计量比

Fig. 4 Ratio of C:N, C:P, C:K, N:P, N:K, P:K under different vegetation area

2.5 土壤生态化学计量特征与土壤物理结构的关系

选取与土壤化学计量比相关性极显著且能够表征土壤物理结构的土壤含水率、粘粒含量和砂粒含量作为自变量,与土壤碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比、磷钾比进行回归分析(图 6)。对土壤碳氮比、磷钾比与土壤物理结构的回归方程进行显著性检验, P 值均大于 0.05,拟合效果不理想。分别对土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比与土壤含水率、粘粒含量和砂粒含量进行回归分析,土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比随着含水率和砂粒含量的升高呈指数型上升趋势,而随着粘粒含量的升高呈指数型下降的趋势。对回归方程进行显著性检验,碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比与土壤含水率进行指数拟合的 F 值分别为 22.355、60.390、32.564、67.722, P 值均小于 0.01;与粘粒含量进行指数拟合的 F 值分别为 51.257、49.338、26.310、10.074, P 值均小于 0.05;与砂粒含量进行指数拟合的 F 值分别为 28.145、12.685、18.516、5.698, P 值均小于 0.05。

3 讨论

3.1 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾对海拔梯度及土层的响应

土壤作为植物生长的基质,其养分特征具有空间和时间上的异质性^[23]。土壤养分含量是海拔梯度主导下地形、气候以及生物因素相互作用的结果。研究区不同海拔土壤有机碳和全氮含量随着海拔的升高而增

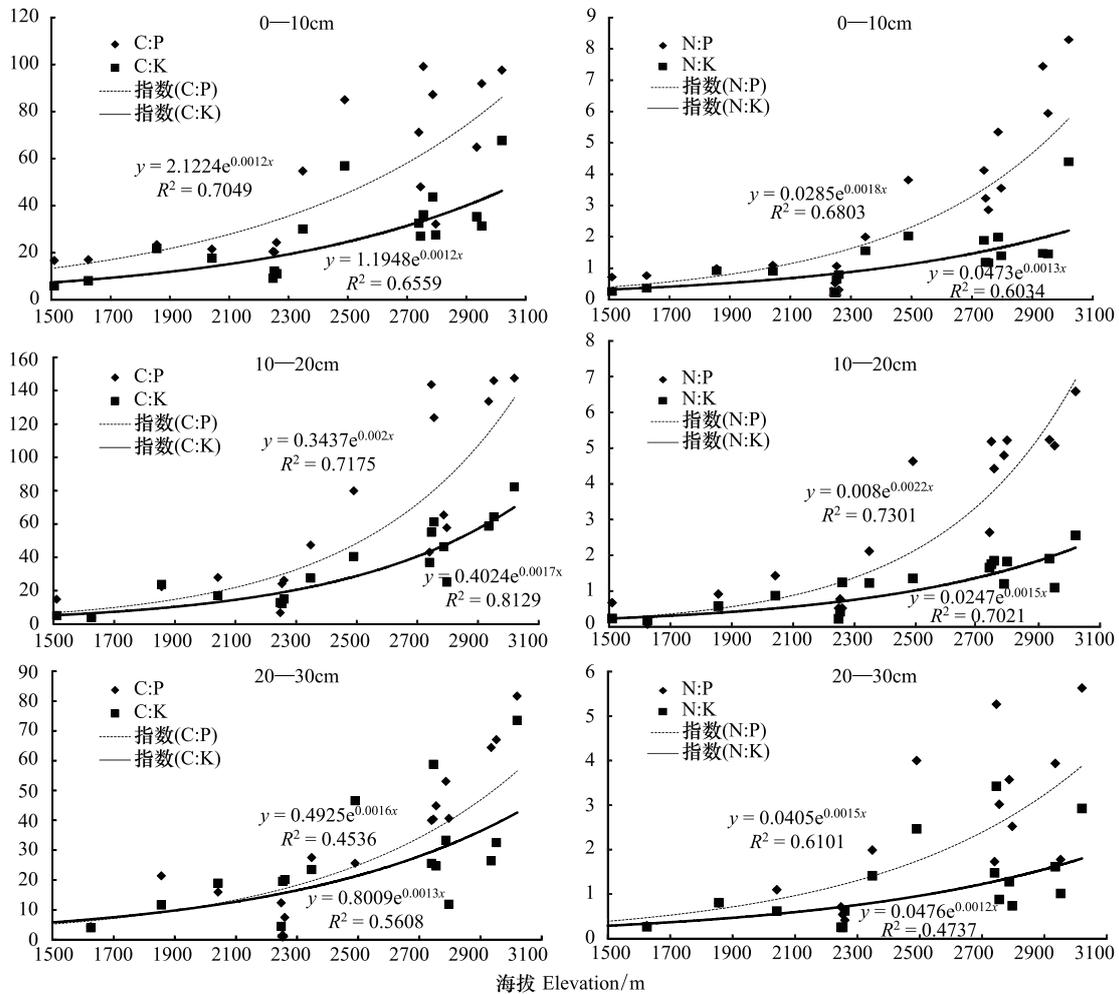


图5 土壤化学计量特征与海拔的关系

Fig. 5 Regression analysis of Soil stoichiometry characteristic and elevation

加,全磷和全钾含量随着海拔的升高而降低。土壤有机碳储量受到地表植被凋落物的矿化分解和转化累积的作用,土壤全氮含量主要受氮素的矿化和固定、硝化与反硝化、植物吸收、地表径流、硝酸盐淋溶以及动植物体归还等作用的影响,而这些过程很大程度上受土壤微生物活力的影响,随着海拔的升高,气温降低,土壤微生物活性减弱,动植物残体分解速度减慢,土壤有机碳氮矿化速率减慢,使土壤中有机碳和氮积累量得以增加^[24]。张巧明等在研究秦岭不同海拔土壤理化性质时^[25]发现土壤全氮含量随着海拔的升高而增加,与本研究结果一致。此外,降水和温度等气候要素影响着土壤的风化速率和养分元素的淋溶强度^[26,-27],随着降水和温度的增加,土壤风化程度增强,土壤磷、钾的密度逐渐降低。Neufeldt 等研究表明^[28],高温多雨的环境有助于加快土壤的风化速率和磷、钾元素的淋溶,研究中随着海拔的升高,土壤全磷、全钾含量逐渐降低的主要原因可能和不同海拔降水量的差异有关。在本研究区的不同海拔梯度,土壤的有机碳和全氮均随着土层的加深呈降低的趋势,而全磷和全钾的变化趋势不明显,这个结论与朱秋莲^[29]、魏孝安^[30]等得出的结果一致。

3.2 土壤生态化学计量比对海拔梯度、土层、植被区及土壤物理结构的响应

土壤的生态化学计量比主要受区域水热条件和成土作用特征的控制,由于气候、地貌、时间、土壤生物、母质类型以及人类干扰的影响,土壤碳、氮、磷、钾总量变化差异较大,进而使 C:N:P:K 的空间变异性很大。研究表明,我国热带、亚热带地区的红壤、黄壤中 C:N 可高达 20:1,而湿润温带土壤中的 C:N 稳定在 10:1 到 12:1 左右^[3],云南省普洱市常绿阔叶原始林土壤碳氮比为 23^[5]。本研究中,海拔梯度从低到高碳氮比依次为 21.3、18.12 和 19.51,接近于热带亚热带红壤、黄壤的 C:N 比。

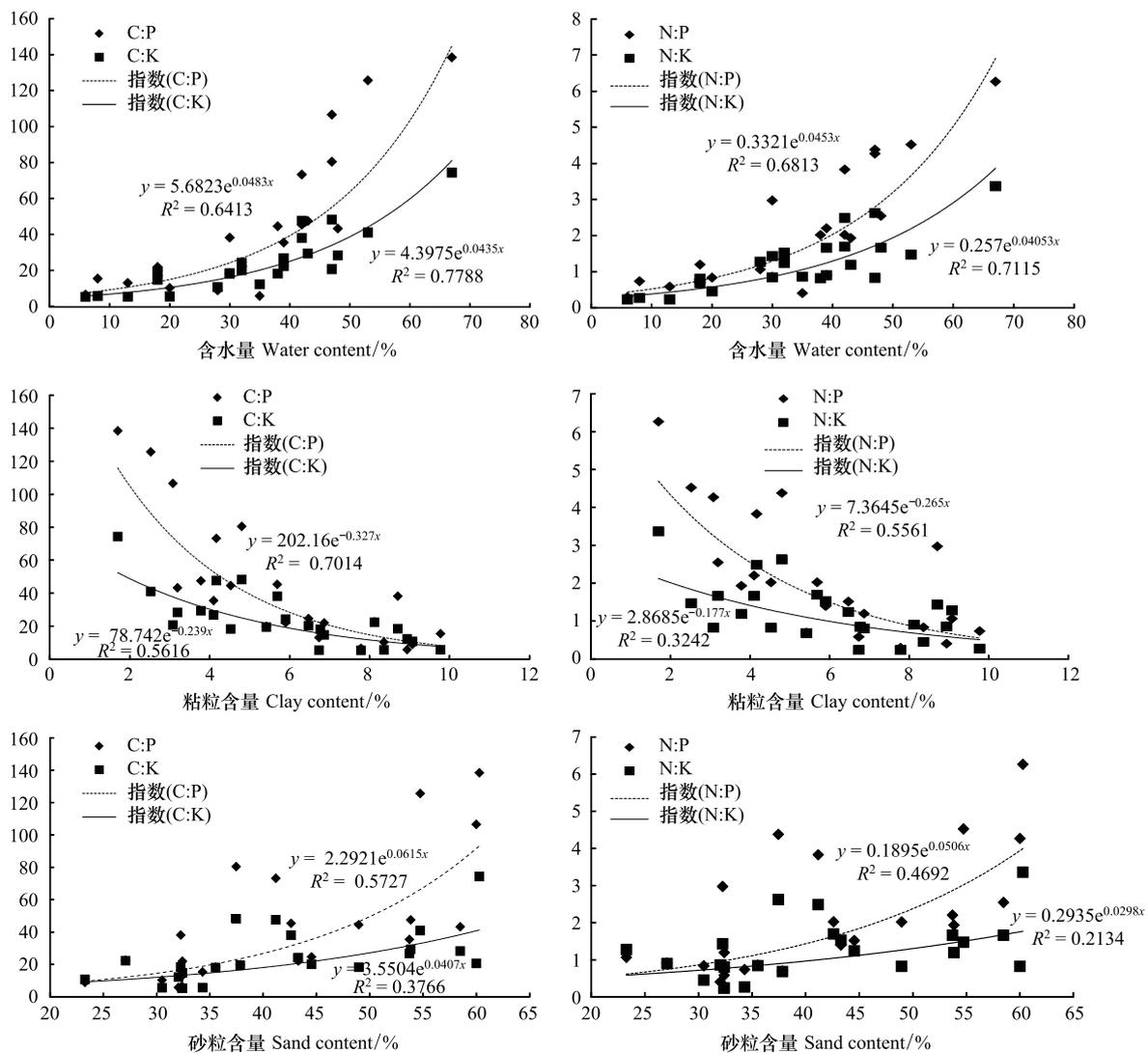


图 6 土壤化学计量特征与物理结构的关系

Fig. 6 Regression analysis of Soil stoichiometry characteristic and physical structure

不同海拔梯度和不同土壤深度间土壤碳氮比差异性均不显著,且与土壤有机碳含量变化较为稳定,一方面可能由于本研究取土样深度较浅,未深入到土壤矿物层,另一方面也验证了不同生态系统土壤碳氮比相对稳定的结果^[31]。随着海拔梯度的升高,土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比逐渐增加,而磷钾比逐渐降低,且不同土壤深度碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比分异明显,这是因为有机碳和全氮对海拔和外界环境因子较为敏感,土壤全磷和全钾相对稳定,而相对于全钾,土壤全磷随着海拔升高其淋溶更为明显。另外低海拔地区人类活动频繁,不利于有机碳和氮的积累,导致碳氮含量较低,而人为施肥产生的磷源输入使土壤全磷含量较高也是其主要原因^[32]。

植被类型对土壤养分具有重要影响,许多研究表明不同植被类型的土壤碳氮比存在显著差异^[3],在本研究中,同一海拔梯度内森林群落类型区和灌草丛群落类型区土壤的生态化学计量比差异性并不显著,且2种植被群落类型区土壤养分及其生态化学计量比随海拔梯度的变化具有一致性,这一现象可能是由于泥石流频发区山地生态系统稳定性差,自我调节能力弱,对外界扰动反馈敏感,系统内部植物对土壤养分通量的调控作用不足。灌草丛植被群落区内,碳氮比与植被盖度呈极显著正相关性,说明灌草丛群落地上植物是土壤中碳素和氮素的主要来源,即土壤碳素主要来源于进入土壤有机质的数量及其腐殖化系数的大小,土壤氮素主要来源于生物固氮和随降水进入土壤中的氮^[33],而土壤磷、钾主要与母质风化有关,故与灌丛植物盖度相关性

不显著;森林群落区内,由于研究区地质灾害和人工干扰严重,原始乔木群落已极少分布,现已人工针叶林、阔叶林及针阔混交林为主要植被类型^[19],其碳、氮主要来源以地表凋落物为主,故与平均树高和平均胸径相关性不大,而前人研究表明植物根系的生长有助于降低土壤磷、钾等矿质元素的固定,增加其有效性。这可能是因为林木的根系能够分泌 H^+ 和有机酸等物质有关^[34],而随着林木高度的增加,其根系分布加深,且根幅、树高和胸径均随着林龄的增加而增加^[35],因此森林群落区乔木种的平均树高与土壤磷钾比具有极显著负相关性。

土壤的物理结构影响着土壤的通气、透水、持水、导热等功能,是制约土壤养分含量高低的重要因素^[36-37]。本研究表明土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比随着含水率的增加和砂粒的增加呈指数型上升而随着粘粒的增加呈指数型下降的趋势,这是因为一方面由于本研究所取土样仅为 0—30cm,未达到土壤黏盘,故砂粒含量越多的土壤更容易吸收降水进而导致土壤水分增大,而随着土壤含水量增加,全磷和全钾淋溶程度加强,相关性分析表明,土壤砂粒和含水率均与海拔呈极显著正相关,砂粒与含水率较高的土壤由于海拔较高,温度较低,在低温湿润的环境下,有机质不易矿化,以积累为主;另一方面,土壤粘粒含量越多,土壤颗粒越小,对磷、钾的吸附能力越强,土壤全磷和全钾含量越高^[22],而粘粒含量较高的低海拔地区温度相对较高,降水较少,气候以干热为主,有机质矿化作用显著,碳、氮含量较低。

鉴于以上研究结果,泥石流频发区脆弱山地生态系统的恢复过程中,应当充分考虑土壤性质与海拔梯度、地形、气候环境等因子之间的耦合作用关系,根据土壤性质对不同环境因子的响应特征因地制宜的制定恢复措施,选择适应性较好、养分回归能力强的本地物种,促进区域土壤-植被-环境系统的可持续发展。

4 结论

1) 不同海拔梯度和不同土壤深度间土壤碳氮比差异性均不显著,随着海拔梯度的升高,土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比逐渐增加,而磷钾比逐渐降低,且不同土壤深度碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比分异明显。

2) 同一海拔梯度内森林群落类型区和灌草丛群落类型区土壤的生态化学计量比差异性不显著,且 2 种植被群落类型区土壤养分及其生态化学计量比随海拔梯度的变化具有一致性。

3) 灌草丛植被区内土壤碳氮比与地上植被盖度具有极显著正相关性,森林植被区内土壤磷钾比与主要乔木种的平均高度具有极显著负相关性而与平均胸径具有显著负相关性。

4) 土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比与海拔高度呈极显著正相关,而碳氮比和磷钾比与海拔相关性不显著。

5) 不同土壤深度处的碳氮比、碳钾比、氮磷比和氮钾比均随着海拔梯度的升高呈指数型上升。

6) 土壤碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比随着含水率的增加和砂粒的增加呈指数型上升而随着粘粒的增加呈指数型下降的趋势。

参考文献 (References):

- [1] 刘蓉, 张卫国, 江小雷, 张军. 垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究. 草业科学, 2010, 27(10): 96-103.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [4] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [5] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [6] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 张志钧, 李忠文. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [7] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 李魁, 刘国华. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化. 生态学报, 2012, 32(11):

- 3467-3476.
- [8] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的 C:N:P 化学计量学特征. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [9] 刘佳庆, 孟莹莹, 包也, 贾娟, 周莉, 周旺明, 于大炮, 代力民. 长白山林线植物岳桦和牛皮杜鹃养分化学计量特征及其影响因子. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3117-3124.
- [10] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.
- [11] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征. 植物生态学报, 2008, 32(1): 13-22.
- [12] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 仝川, 张林海. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [13] 严正兵, 金南瑛, 韩廷申, 方精云, 韩文轩. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响. 植物生态学报, 2013, 37(6): 551-557.
- [14] 邹翔, 崔鹏, 陈杰, 王道杰. 小江流域土壤抗冲性实验研究. 水土保持学报, 2004, 18(2): 71-73.
- [15] 庄建琦, 葛永刚. 土壤侵蚀对土地利用和降雨变化响应和空间分布特征——以金沙江一级支流小江流域为例. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 288-295.
- [16] 林勇明, 崔鹏, 葛永刚, 王道杰. 蒋家沟流域景观空间格局变化及其干扰效应的模拟分析. 中国水土保持科学, 2010, 8(6): 32-40.
- [17] 徐世光, 李长才, 王明珠. 云南小江泥石流与泥石流滩地开发. 地学前缘, 2001, 8(2): 296-300.
- [18] 王道杰, 崔鹏, 朱波, 王玉宽. 金沙江干热河谷植被恢复技术及生态效应——以云南小江流域为例. 水土保持学报, 2004, 18(5): 95-98.
- [19] 张广帅, 邓浩俊, 俞伟, 林勇明, 马瑞丰, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析——以云南小江流域为例. 应用与环境生物学报, 2014, 20(4): 646-654.
- [20] 杜荣桓, 康志成, 陈循谦, 朱平一. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987.
- [21] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1997: 12-86.
- [22] 严旭升. 土壤肥力研究方法. 北京: 农业出版社, 1998: 123-174.
- [23] Campbell B D, Grime J P. A comparative study of plant responsiveness to the duration of episodes of mineral nutrient enrichment. *New Phytologist*, 1989, 112(2): 261-267.
- [24] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 何飞. 川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征. 林业科学研究, 2012, 25(3): 261-268.
- [25] 张巧明, 王得祥, 龚明贵, 张丽楠. 秦岭火地塘林区不同海拔森林土壤理化性质. 水土保持学报, 2011, 25(5): 69-73.
- [26] Walker T W, Syers J K. The fate of P during pedogenesis. *Geoderma*, 1976, 14: 1-19.
- [27] Gardner L R. The role of rock weathering in the phosphorus budget of terrestrial watersheds. *Biogeochemistry*, 1990, 11(2): 97-110.
- [28] Neufeldt H, Da Silva J E, Ayarza M A, Zech W. Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(1): 30-37.
- [29] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵区不同植被区土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [30] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
- [31] 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.
- [32] 韩琳, 李征, 曾艳, 安树青, 冷欣. 太湖流域河岸带不同土地利用下草本植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3281-3288.
- [33] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [34] Clarholm M. Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. *Soil Biology Biochemistry*, 1985, 17(2): 181-187.
- [35] 郝艳茹, 彭少麟. 南亚热带地带性植被优势树种根系的研究. 北京林业大学学报, 2009, 31(2): 25-30.
- [36] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1/4): 259-281.
- [37] 毕银丽, 王百群, 郭胜利, 余存祖. 黄土丘陵区坝地系统土壤养分特征及其与侵蚀环境的关系 II. 坝地土壤粒径分布及各粒径的养分状况. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 37-43.