

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.020

赵洛琪, 付登高, 吴晓妮, 等. 滇中不同植物群落土壤养分及其计量比的变化特征. 土壤, 2020, 52(6): 1248–1255.

滇中不同植物群落土壤养分及其计量比的变化特征^①

赵洛琪¹, 付登高^{1*}, 吴晓妮^{1,2}, 朱安琪¹, 徐子萱¹

(1 云南大学生态与环境学院暨云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091; 2 昆明学院农学与生命科学学院, 昆明 650214)

摘要: 为了研究不同植物群落土壤养分的时空动态变化特征及其养分计量比特征, 选择滇中高原 5 种典型植物群落的土壤为研究对象, 分析了旱、雨季不同营养元素及其计量比在土壤不同深度中的分布特征, 并应用灰色关联分析探讨了不同群落的土壤综合肥力及其改良效应。结果表明: ①在空间尺度上, 土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量随土壤深度增加而降低, 全钾含量则随土壤深度增加而增加, 而磷含量在土壤剖面中相对保持稳定; 除全钾含量外, 植物群落对上层土壤的改良效益较高, 导致表层土壤养分明显高于中下层; ②在时间尺度上, 除常绿阔叶林雨季肥力略有下降外, 其他 4 种群落雨季的综合肥力均比旱季有所增加。总体看来, 常绿阔叶林对土壤养分的影响改良效益最高, 而云南松林对土壤养分的改良效益最低; ③不同植物群落上层土壤 C:N、C:P 和 N:P 总体上高于中层与下层土壤, 雨季植物群落除桉树林外土壤 C:N 小于旱季, 雨季土壤 C:P、N:P 总体上高于旱季; 土壤养分化学计量比结果表明土壤氮、磷养分是限制植物群落发展的主要限制因子。因此, 从不同群落对土壤养分的影响及其生态水文过程上差异的角度出发, 建议在滇中脆弱区的生态修复过程中, 尽量控制桉树林的种植面积, 对云南松林进行抚育增加其中阔叶树种的比例, 以此增加植物群落对土壤养分的改善效益, 进而减少水土流失的风险, 并为当地树种的选择从土壤养分变化的角度提供一定的参考。

关键词: 植物群落; 土壤养分; 时空变化; 生态化学计量; 土壤改良

中图分类号: S714; Q145 **文献标志码:** A

Changes of Soil Nutrients and Stoichiometric Characteristics Under Different Vegetation Communities in Central Yunnan Province

ZHAO Luoqi¹, FU Denggao^{1*}, WU Xiaoni^{1,2}, ZHU Anqi¹, XU Zixuan¹

(1 School of Ecology and Environmental Sciences & Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2 School of Agronomy and Life Sciences, Kunming University, Kunming 650214, China)

Abstract: Soil samples under five typical vegetation communities were collected in 0–30, 30–60 and 60–90 cm depths in dry and rainy seasons in the central Yunnan plateau, nutrients were measured and stoichiometric parameters were calculated, comprehensive soil fertility and the improvement effects of different vegetation communities were compared using grey correlation analysis. The results showed that the contents of total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter decreased but total potassium increased with the increase of depth, while the content of phosphorus remained relatively stable. Except total potassium, soil nutrients increased under vegetation communities in 0–30 cm depth, which were significantly higher than those in 30–60 cm and 60–90 cm depths. Soil comprehensive fertility decreased slightly for evergreen broad-leaved forest in rainy season, but increased for other four vegetation communities compared with in dry season. Generally speaking, the beneficial effect of evergreen broad-leaved forest on soil nutrient improvement was the highest, while that of *Pinus yunnanensis* forest was the lowest. C:N, C:P and N:P in 0–30 cm soil under different vegetation communities were higher than those in 30–60 cm and 60–90 cm depths, C:N in rainy season was lower than that in dry season

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31860133)、云南省地方本科高校基础研究联合专项(2017FH001-044)和云南省重点研发专项(2019BC001)资助。

* 通讯作者(dgfu@ynu.edu.cn)

作者简介: 赵洛琪(1995—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要研究方向为恢复生态学。E-mail: 3050634764@qq.com

except for *Eucalyptus* forest, C:P and N:P in rainy season were generally higher than those in dry season. Soil nitrogen and phosphorus were the main limiting factors for the development of vegetation communities. Therefore, considering the effects of different vegetation communities on soil nutrients and their differences in eco-hydrological processes, in the process of ecological restoration in fragile areas of central Yunnan, the planting area of *Eucalyptus* should be controlled as far as possible, and the proportion of broad-leaved trees should be increased in *Pinus yunnanensis* forests to promote soil nutrient accumulation and reduce soil and water losses. The above results can provide references for the selection of local tree species from the perspective of soil nutrients.

Key words: Plant communities; Soil nutrient stoichiometry; Spatial-temporal variation; Eco-stoichiometry; Soil improvement

在我国的滇中地区,人类活动对生态环境破坏严重,地表径流的增加导致污染进一步加剧^[1]。自20世纪80年代中期以来,各级政府实施了“长江中上游水土流失重点防治工程”,通过营造水土保持林以控制山地的水土流失,目前对不同植物群落在土壤肥力及水土保持功能上的研究有较多的工作,但是多针对人工林或植物演替序列上土壤养分及其生态过程功能上的比较^[2-7]。在滇中地区,由于人为不同程度的干扰形成了具有演替序列的不同植物群落类型,与此同时,在滇中高原大规模地营造桉树林也取得了显著成效,数十万亩荒山在几年内被绿化,并提供了桉叶油、桉树材等,为此获得了显著的生态和经济效益。但同时桉树耗水、耗肥多,使生态环境退化,物种数量减少,群落结构简单,引起了人们广泛的关注^[8]。

关于自然林、人工林对土壤环境改良作用的研究有很多的工作积累,比如Li等^[9]研究表明次生常绿阔叶林具有较好的水土保持效果;也有研究表明云南松次生林与灌草丛的蓄水减流的效应明显,减流率均达91%以上^[10];同时针阔混交林小时间尺度内碳通量变化明显^[11],且凋落物中磷的利用效率较高^[12]。但是从人工和自然演替序列进行对比分析不同植物群落下土壤养分的时空变化的研究还需要进一步加强。土壤养分的时空变化特征是土壤、植被和周围环境共同作用的结果^[13]。因此,研究土壤养分含量的时空动态变化特征不仅可以反映不同植物群落对土壤养分的影响状况,同时也为植被恢复的形式、方向和速度等提供一定的依据。目前国外有很多关于C、N、P化学计量学研究,研究对象由水生生态系统和湿地生态系统延伸到陆地生态系统。主要集中在种群动态变化^[14]和生态系统养分供求平衡及其应用^[15]。

为此,本文综合研究了滇中5种不同植物群落土壤剖面中土壤养分含量的时空变化与土壤养分生态化学计量的变化特征,并在此基础上探讨了不同植物群落对土壤的改良效应,对正确分析不同植物群落的涵养水源功能、合理利用土壤、防止地力衰退、合理

经营森林资源、改善水分环境等都具有重要的现实意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究样地位于滇中高原楚雄州牟定县凤屯乡,位于101°28'18"E, 25°24'09"N,海拔2100~2200 m,是北亚热带湿润季风气候,年降雨量600~1000 mm,有明显的干湿季,降雨主要集中在6—10月,其降雨量占全年降雨量的80%。该样地分布于丘陵侵蚀地貌,成土母岩为白垩系江底河组紫红色页岩,经过强烈的风化发育形成紫色沙土。该区域分布着地带性次生性滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)-滇油杉(*Keteleeria evelyniana*)-滇石栎(*Lithocarpus dealbatus*)群落、云南松(*Pinus yunnanensis*)-滇油杉(*K. evelyniana*)-滇青冈(*C. glaucoides*)群落、云南松(*P. yunnanensis*)-小铁仔(*Myrsine africana*)-竹叶草(*O. plismenus composites*)群落、史密斯桉(*Eucalyptus smithii*)-小铁仔(*M. africana*)-竹叶草(*O. composites*)群落、厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*)-老鸦泡(*Gaultheria yunnanensis*)-白茅(*Imperata cylindrica*)群落,以下分别简称为常绿阔叶林、针阔混交林、云南松林、桉树林和荒坡灌草丛。其中荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林与常绿阔叶林构成了一个演替序列,而桉树林中的桉树于1991年引种种植,现已为区域内典型的人工种植林。5种植物群落的立地条件、土壤母质和水热条件等均相对一致。

1.2 土样的采集及土壤养分测定

根据当地气候情况,4月和9月为旱季和雨季的典型期。在这2个时期内,选择5种植物群落典型样地,每种植物群落随机选择3个20 m×20 m的样方进行土壤样品的采集,每个样方距离至少在100 m,样方的坡向与坡度相对一致。每个样地的土层取0~30、30~60、60~90 cm(以下简称上层、中层和下层)3个层次土样,获得混合土样后带回实验室分析。土壤

按测试项目的要求风干, 磨碎过筛以供土壤养分测定。

土样养分指标包括土壤全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾及有机质。测定方法: 全氮采用半微量凯氏定氮法, 碱解氮采用碱解扩散吸收法, 全磷采用酸溶-钼锑抗比色法, 有效磷采用双酸浸提-钼锑抗比色法, 全钾采用 HF-HClO₄ 溶解-原子吸收法, 速效钾采用乙酸铵浸提-原子吸收法, 有机质采用重铬酸钾-氧化外加热法^[16]。

1.3 数据分析

选择土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾, 速效钾作为评价土壤肥力的标准。采取指标区间化对数据进行处理, 处理后再进行关联系数和关联度的计算^[17], 以此评价不同植物群落对土壤肥力的综合影响。土壤养分及其计量比之间的差异均利用 SPSS 19.0 进行统计分析。

2 结果

2.1 旱季不同植物群落土壤养分状况

旱季不同植物群落不同土壤层次间养分含量的

变化特征不尽相同(表 1)。从表 1 可以看出: 土壤全氮、碱解氮、有机质及速效钾在 5 个群落中随着土壤深度的增加, 其含量降低; 对全钾除云南松林表现为先降低后增加的趋势外, 其他群落均表现为随着土壤深度的增加, 其含量增加; 而全磷含量虽有不同变化, 但不同层次之间的差异并不显著; 而有效磷除桉树林外在上层中的含量显著高于中、下层外, 其他群落内的有效磷含量随着土壤深度的增加均呈递减趋势。旱季不同植物群落不同土壤层次间的综合肥力表现也不同(表 2)。对于针阔混交林和常绿阔叶林, 它们的变化趋势是先减少后增加; 而云南松林、荒坡灌草丛是随深度增加, 肥力减少; 桉树林则是先升高后降低。按大小排序, 针阔混交林为上层>下层>中层; 常绿阔叶林为下层>上层>中层; 荒坡灌草丛、云南松林为上层>中层>下层; 桉树林为中层>下层>上层。

旱季相同土壤层次下不同植物群落土壤养分含量及综合肥力见表 1 和表 2。对于土壤上层而言, 混交林的全氮及全磷含量最高, 常绿阔叶林的有效磷、速效钾和有机质最高, 碱解氮含量荒草坡最高; 云南松林的全钾含量最高。根据灰色关联分析求得的关联

表 1 旱季不同群落土壤养分含量
Table 1 Contents of soil nutrients under different vegetation communities in dry season

养分	土层	荒坡灌草丛	云南松林	针阔混交林	常绿阔叶林	桉树林
全氮 (g/kg)	上层	0.46 ± 0.10 a	0.52 ± 0.16 a	0.63 ± 0.10 a	0.60 ± 0.05 a	0.44 ± 0.11 a
	中层	0.33 ± 0.07 ab	0.25 ± 0.11 b	0.24 ± 0.02 b	0.44 ± 0.07 b	0.34 ± 0.11 ab
	下层	0.25 ± 0.05 b	0.24 ± 0.14 b	0.24 ± 0.03 b	0.34 ± 0.01 c	0.28 ± 0.04 b
碱解氮(mg/kg)	上层	59.10 ± 15.70 a	48.00 ± 6.67 a	54.36 ± 3.82 a	54.83 ± 10.69 a	50.77 ± 3.73 a
	中层	35.10 ± 4.70 b	26.53 ± 10.35 b	42.59 ± 12.59 ab	34.53 ± 9.81 b	35.22 ± 20.93 ab
	下层	25.59 ± 6.74 b	21.20 ± 5.33 b	31.49 ± 1.86 b	25.67 ± 11.76 b	16.91 ± 7.22 b
全磷(g/kg)	上层	0.30 ± 0.20 a	0.27 ± 0.21 a	0.37 ± 0.08 a	0.35 ± 0.16 a	0.30 ± 0.012 a
	中层	0.28 ± 0.19 a	0.31 ± 0.13 a	0.24 ± 0.19 a	0.39 ± 0.22 a	0.37 ± 0.015 a
	下层	0.24 ± 0.18 a	0.27 ± 0.08 a	0.20 ± 0.12 a	0.36 ± 0.19 a	0.30 ± 0.024 a
有效磷(mg/kg)	上层	1.024 ± 0.497 a	1.384 ± 0.884 a	1.187 ± 0.052 a	1.943 ± 0.635 a	1.425 ± 0.393 a
	中层	0.520 ± 0.060 ab	0.758 ± 0.993 a	0.393 ± 0.113 b	0.946 ± 0.327 b	0.847 ± 0.49 b
	下层	0.43 ± 0.144 b	0.694 ± 0.838 a	0.412 ± 0.326 b	1.036 ± 0.18 b	0.428 ± 0.246 b
全钾(g/kg)	上层	11.66 ± 2.76 a	17.32 ± 1.96 a	7.89 ± 0.80 b	12.85 ± 7.20 a	14.91 ± 4.22 a
	中层	12.82 ± 3.01 a	14.31 ± 0.69 b	12.86 ± 1.04 a	13.48 ± 7.35 a	16.99 ± 7.95 a
	下层	13.43 ± 1.37 a	17.93 ± 1.56 a	13.38 ± 1.05 a	13.85 ± 5.90 a	17.29 ± 6.40 a
速效钾(mg/kg)	上层	109.9 ± 2.011 a	118.3 ± 23.9 a	145.8 ± 28.5 a	207.0 ± 92.0 a	91.0 ± 27.5 a
	中层	97.9 ± 18.089 a	51.1 ± 31.0 b	85.2 ± 17.3 b	197.5 ± 81.6 a	81.7 ± 21.2 a
	下层	89.7 ± 30.5 a	42.9 ± 31.2 b	85.4 ± 33.9 b	154.7 ± 45.7 a	72.6 ± 15.6 a
有机质(g/kg)	上层	18.45 ± 5.21 a	20.21 ± 5.26 a	15.55 ± 0.97 a	24.39 ± 5.07 a	16.06 ± 3.82 a
	中层	9.76 ± 2.17 b	8.28 ± 3.02 b	8.28 ± 0.77 b	11.20 ± 2.96 b	12.27 ± 3.74 b
	下层	8.20 ± 1.22 b	7.86 ± 5.09 b	8.46 ± 0.92 b	10.01 ± 4.95 b	8.82 ± 2.09 b

注: 表中同列数据小写字母不同表示相同植物群落下不同土壤深度土壤养分含量差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下表同。

表 2 不同群落土壤肥力的关联度表
Table 2 Grey relative degrees of soil fertility under different vegetation communities

季节	土层	荒坡灌草丛	云南松林	针阔混交林	常绿阔叶林	桉树林
旱季	上层	0.067 5	0.060 2	0.082 1	0.121 5	0.053 2
	中层	0.063 5	0.057 6	0.065 0	0.119 5	0.095 2
	下层	0.058 4	0.056 9	0.068 0	0.130 4	0.060 4
	平均	0.631 3	0.058 2	0.071 7	0.123 8	0.069 6
雨季	上层	0.118 0	0.068 3	0.076 1	0.086 5	0.070 2
	中层	0.075 5	0.077 7	0.082 2	0.078 9	0.093 5
	下层	0.072 3	0.058 1	0.084 8	0.093 5	0.083 3
	平均	0.088 6	0.068 0	0.081 0	0.086 3	0.082 3

度, 旱季土壤上层肥力的排列顺序为: 常绿阔叶林>针阔混交林>荒坡灌草丛>云南松林>桉树林。土壤中层的养分含量以常绿阔叶林最高, 其全氮、全磷、有效磷、速效钾含量为 5 个群落最高, 根据关联度也发现土壤中层的肥力的顺序为: 常绿阔叶林>桉树林>针阔混交林>荒坡灌草丛>云南松林, 可以看出人工桉树林对土壤中层的改良效应还是比较好的。土壤下层养分含量以常绿阔叶林最高, 其全氮、全磷、有效磷、速效钾和有机质含量为 5 个群落最高, 关联度分析也说明了这一点, 其排序为常绿阔叶林>针阔混交林>桉树林>荒坡灌草丛>云南松林。

2.2 雨季不同植物群落土壤肥力状况

雨季不同植物群落不同土壤层次间养分含量的

变化见表 3。除有效磷外, 其他元素的变化基本相同, 即 5 个群落土壤全氮、碱解氮、速效钾和有机质含量随土壤深度增加而降低; 全磷除常绿阔叶林外均维持较稳定水平; 而全钾含量随土壤深度增加呈增加趋势, 其中云南松林和针阔混交林增加比较显著。雨季不同植物群落土壤有效磷含量除常绿阔叶林和桉树林不同土壤层次之间无显著差异外, 其他 3 种群落下层的有效磷均显著高于中、下层土壤。雨季不同植物群落不同土壤层次间的综合肥力表现见表 2。从表 2 可看出, 荒坡灌草丛是随深度增加, 肥力减少, 即上层>中层>下层; 云南松林为中层>上层>下层; 针阔混交林为下层>中层>上层; 常绿阔叶林为下层>上层>中层; 桉树林为中层>下层>上层。

表 3 雨季不同群落土壤养分含量
Table 3 Contents of soil nutrients under different vegetation communities in wet season

养分	土壤层次	荒坡灌草丛	云南松林	针阔混交林	常绿阔叶林	桉树林
全氮(g/kg)	上层	0.56 ± 0.05 a	0.50 ± 0.09 a	0.50 ± 0.07 a	0.62 ± 0.25 a	0.30 ± 0.08 a
	中层	0.38 ± 0.06 b	0.36 ± 0.09 ab	0.43 ± 0.10 a	0.25 ± 0.10 b	0.28 ± 0.09 a
	下层	0.24 ± 0.05 c	0.27 ± 0.05 b	0.35 ± 0.14 a	0.27 ± 0.01 b	0.22 ± 0.06 a
碱解氮(mg/kg)	上层	128.16 ± 51.66 a	94.04 ± 33.95 a	90.07 ± 10.07 a	84.66 ± 20.80 a	63.81 ± 21.84 a
	中层	47.73 ± 8.51 b	44.01 ± 8.02 b	64.23 ± 39.35 ab	58.92 ± 9.46 ab	36.82 ± 19.06 a
	下层	39.79 ± 6.11 b	37.06 ± 19.22 b	32.59 ± 12.24 b	42.95 ± 6.27 b	39.34 ± 15.54 a
全磷(g/kg)	上层	0.20 ± 0.003 a	0.13 ± 0.002 a	0.18 ± 0.001 a	0.20 ± 0.004 a	0.22 ± 0.004 a
	中层	0.20 ± 0.002 a	0.14 ± 0.001 a	0.12 ± 0.002 b	0.17 ± 0.002 a	0.24 ± 0.011 a
	下层	0.19 ± 0.001 a	0.15 ± 0.002 a	0.12 ± 0.002 b	0.19 ± 0.003 a	0.23 ± 0.012 a
有效磷(mg/kg)	上层	0.821 ± 0.182 a	0.713 ± 0.349 a	0.885 ± 0.189 a	0.704 ± 0.228 a	0.612 ± 0.104 a
	中层	0.547 ± 0.121 b	0.305 ± 0.176 b	0.344 ± 0.158 b	0.825 ± 0.367 a	0.788 ± 0.115 a
	下层	0.548 ± 0.059 b	0.305 ± 0.176 b	0.342 ± 0.118 b	0.674 ± 0.181 a	0.816 ± 0.167 a
全钾(g/kg)	上层	9.20 ± 3.82 a	14.42 ± 0.64 b	6.87 ± 0.55 b	7.80 ± 1.96 a	11.61 ± 4.63 a
	中层	10.53 ± 5.27 a	18.18 ± 1.91 a	13.63 ± 3.84 a	8.23 ± 1.55 a	13.06 ± 6.16 a
	下层	11.20 ± 5.72 a	19.74 ± 2.34 a	13.23 ± 4.10 a	8.81 ± 1.12 a	13.82 ± 7.29 a
速效钾(mg/kg)	上层	189.8 ± 30.7 a	190.413 ± 19.0 a	177.66 ± 15.0 a	185.056 ± 38.5 a	194.51 ± 35.9 a
	中层	185.1 ± 15.0 a	151.736 ± 45.4 a	128.603 ± 23.4 b	175.946 ± 45.2 ab	138.09 ± 48.9 ab
	下层	172.6 ± 19.6 a	141.98 ± 49.97 a	120.757 ± 21.3 b	103.269 ± 11.3 b	94.356 ± 13.0 b
有机质(g/kg)	上层	22.15 ± 1.60 a	18.2 ± 1.10 a	15.31 ± 2.06 a	15.58 ± 5.84 a	11.64 ± 4.93 a
	中层	8.82 ± 1.09 b	7.23 ± 1.20 b	6.36 ± 0.51 b	6.60 ± 3.25 b	10.65 ± 3.39 a
	下层	6.59 ± 1.34 b	6.62 ± 1.71 b	6.22 ± 0.87 b	4.29 ± 1.33 b	7.69 ± 2.82 a

雨季相同土壤层次下不同植物群落土壤养分含量及综合肥力见表 2 与表 3。土壤上层以荒坡灌草丛的有机质、碱解氮、有效磷含量最高,因此,经灰色关联分析得出:荒坡灌草丛>常绿阔叶林>针阔混交林>桉树林>云南松林。对土壤中层,不同养分的最高值分布也不均,其中以桉树林的有机质、全磷、有效磷最高,因此不同群落的综合肥力的排序为:桉树林>针阔混交林>常绿阔叶林>云南松林>荒坡灌草丛。对土壤下层而言,不同养分的最高值分布也不均,经灰色关联分析得出:常绿阔叶林>针阔混交林>桉树林>荒坡灌草丛>云南松林。

2.3 旱季、雨季之间土壤肥力的变化

不同群落土壤养分及综合肥力在时间尺度上表现出一定的变化(表 1、表 3)。从养分含量来看,有机质含量是旱季>雨季;全磷和有效磷是旱季>雨季;碱解氮是雨季>旱季;对于全氮含量,除常绿阔叶林和桉树林外,其他群落全氮含量是雨季>旱季;对于全钾,除云南松林外,其他群落全钾含量是旱季>雨季;对于速效钾,除荒坡灌草丛和云南松林外,其他

群落的速效钾含量是旱季>雨季。

从表 2 的综合肥力来看,对于土壤上层而言,荒坡灌草丛、云南松林和桉树林雨季上层肥力比旱季有不同程度的增加,而针阔混交林和常绿阔叶林则降低;对于中层,除常绿阔叶林和桉树林肥力降低外,其他群落雨季均比旱季肥力高;对于土壤下层,除常绿阔叶林外其他群落雨季肥力均比旱季有不同程度升高。从综合肥力来看,除常绿阔叶林雨季肥力下降外,其他 4 种群落雨季的综合肥力均比旱季有所增加。

2.4 旱季、雨季之间土壤养分计量比及其变化

不同植物群落的土壤养分计量比分布特征见表 4。5 种不同植物群落上层土壤 C:N、C:P 和 N:P 总体上高于中层与下层土壤。荒坡灌草丛上层土壤 C:N 在旱季(40.11)和雨季(39.55)均最高;针阔混交林雨季中层土壤 C:N 最低,为 14.79;云南松林上层土壤 C:P 和 N:P 均最高,分别为旱季 74.85、1.93,雨季 140.00、3.85;常绿阔叶林雨季下层土壤 C:P 最低,为 22.58;云南松林旱季中层土壤 N:P 最低,为 0.81。

表 4 不同群落土壤养分计量比分布特征
Table 4 Distribution of soil nutrient stoichiometric ratios under different vegetation communities

群落类型	土壤层次	C:N		C:P		N:P	
		旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季
荒坡灌草丛	上层	40.11	39.55	61.50	110.75	1.53	2.80
	中层	29.58	23.21	34.86	44.10	1.18	1.90
	下层	32.80	27.46	34.17	34.68	1.04	1.26
云南松林	上层	38.87	36.40	74.85	140.00	1.93	3.85
	中层	33.12	20.08	26.71	51.64	0.81	2.57
	下层	32.75	24.52	29.11	44.13	0.89	1.80
针阔混交林	上层	24.68	30.62	42.03	85.06	1.70	2.78
	中层	34.50	14.79	34.50	53.00	1.00	3.58
	下层	35.25	17.77	42.30	51.83	1.20	2.92
常绿阔叶林	上层	40.65	25.13	69.69	77.90	1.71	3.10
	中层	25.45	26.40	28.72	38.82	1.13	1.47
	下层	29.44	15.89	27.81	22.58	0.94	1.42
桉树林	上层	36.50	38.80	53.53	52.91	1.47	1.36
	中层	36.09	38.04	33.16	44.38	0.92	1.17
	下层	31.50	34.95	29.40	33.43	0.93	0.96

不同植物群落土壤养分计量比在时间尺度上表现出了明显变化(表 4)。其中不同植物群落 C:N 除针阔混交林上层和常绿阔叶林中层与桉树林土壤外,在雨季均表现出不同程度的减小趋势,其中针阔混交林中层雨季土壤 C:N(14.79),较早季土壤(34.50)减小率为 57.13%;桉树林土壤 C:N 在雨季表现出不同程度

的增大趋势。对于不同植物群落的 C:P,除常绿阔叶林下层与桉树林上层土壤外,在雨季均表现出不同程度的增大趋势,其中针阔混交林雨季上层土壤 C:P(85.06),较早季土壤(42.03)增长率达到 102.38%。对于不同植物群落的 N:P,除桉树林上层土壤外,在雨季均表现出不同程度的增大趋势,其中针阔混交林

雨季中层土壤 N:P(1.00), 较早季土壤(3.58)增长率高, 达 258.00%。

3 讨论

3.1 不同植物群落条件下土壤养分含量空间变化分析

土壤养分是森林生态系统中植物营养的主要来源, 植被物种组成、群落结构及生产能力均受到土壤养分的影响^[18-19]。就不同元素含量而言, 不论在旱季还是雨季, 不同土壤层次间养分含量的变化特点除磷素外其他元素在土壤剖面上的空间分布呈现一定的规律性: 土壤全氮、碱解氮和有机质含量随土壤深度增加而降低; 全钾含量则随土壤深度增加而呈增加的趋势, 但速效钾含量随土壤深度增加反而降低, 其原因可能是由于当地土壤淋洗作用较强, 导致钾元素大量垂直流失, 而造成全钾含量自上而下的增加; 而速效钾在土壤上层被植被根系大量吸收, 所以垂直流失现象不如全钾明显。

土壤含磷量不仅取决于母质种类而且和成土过程中的其他因素有关, 其中生物积累和淋洗作用可能是重要原因, 二者的相对强度是控制土壤含磷量的重要因素^[20]。因此磷含量在土壤剖面中的变化较其他元素复杂。有自上而下增加的, 有自上而下减少的, 有先升高后降低的, 有保持稳定的, 一般上层磷含量较高, 随深度而逐渐减少, 这是由于生物积累所致, 但是在淋溶作用较强的土壤中, 也有可能是上层的磷含量并无显著的增加, 甚至还低于中层或下层土壤, 有些土壤还可能出现磷积聚的层次, 从而造成中层磷富集^[20]。

土壤不同层次的综合肥力在不同群落表现不一样, 对于常绿阔叶林, 不论是旱季还是雨季, 它们的变化趋势是: 随土壤深度先减少后增加, 中层养分低的原因是由于群落的生长对中层养分的吸收量较大有关; 而荒坡灌草是随土壤深度增加, 肥力减少, 原因是由于土壤中下层无根系的吸收, 加上上层凋落物的分解及雨水的淋溶使养分在土壤剖面上呈递减趋势; 桉树林则是先升高后降低, 其上层肥力最低, 中层肥力最高, 其原因可能为桉树根系分布较浅^[21]且对土壤水肥条件需求较高, 会大量吸收土壤上层水分及营养, 造成浅层土壤养分的缺失; 而云南松林和针阔混交林在旱季与雨季的变化则不同, 这可能是群落的组成结构、植被的生物学特性和雨季水文过程共同作用的结果。

3.2 不同植物群落条件下土壤养分含量时间变化分析

在时间尺度上, 不同群落在其相同土壤层次上, 土壤肥力表现出一定的变化。其中荒坡灌草丛和云南松林, 无论是上、中、下层, 其雨季土壤肥力均高于旱季的肥力, 这可能是由于雨季水热配置良好及土壤微生物活性的增加等原因, 使得土壤上层的凋落物得以快速分解, 但由于当地荒坡灌草缺乏灌木层, 云南松林中灌木层盖度较低, 致使养分积累大于植被的消耗和流失量^[5], 从而表现出雨季的肥力大于旱季; 而常绿阔叶林则相反, 其灌木、乔木盖度都较高, 再加上雨季植物生长旺盛, 致使养分积累量小于消耗量^[5], 从而表现出旱季土壤肥力高于雨季土壤肥力; 而针阔混交林和桉树林不同层次上的时间变异由于不同因子的共同作用而呈现不同的趋势, 但需要提及的是雨季的肥力比旱季有所提高, 这就说明养分的积累量大于消耗量和流失量。

3.3 植物群落在旱季/雨季对土壤养分循环的影响

研究表明土壤养分组成是植物外部环境中重要的影响因子, 植物的光合作用、矿质代谢等过程与土壤养分供应状况关系密切^[22], 土壤 C:N 可以衡量 C、N 的营养平衡状况, 并能影响其循环过程, 是土壤质量的敏感性指标^[23], 本研究中 5 种植物群落土壤 C:N(14.79 ~ 40.65)均高于中国土壤 C:N 平均水平 10 ~ 12^[22], 表明实验区内土壤中 N 较为缺乏。土壤 C:P 是 P 素矿化能力的标志^[24]。实验区内土壤 C:P 介于 22.58 ~ 140.00, 有研究认为, 当土壤 C:P < 200 时, 土壤微生物的 C 素含量会短暂增加, 而微生物 P 素则会发生净矿化作用, 从而使土壤中的 P 含量增加^[25], 也就是说, 较低的 C:P 会对土壤 C、P 含量的增加产生积极影响; 也说明实验区内 P 相对缺乏。土壤 N:P 可作为衡量 N 饱和的指标, 指示植物生长过程中土壤养分元素的供应状况^[26], 而实验区内土壤 N:P 介于 0.81 ~ 3.85, 低于全球森林土壤 N:P(6.60)^[27], 进一步证明研究区域土壤中 N 缺乏的状况。

对于不同植物群落土壤养分计量比在时间尺度上的变化, C:N 除桉树林土壤外, 大体表现出下降的趋势。有研究认为土壤 C:N 与有机质分解速度呈反比关系^[28], 由于雨季良好的水热配置, 进一步促进了微生物对凋落物的分解作用, 导致雨季 C:N 的下降; 桉树林上中下 3 层土壤中 C:N 在雨季反而表现出上升的趋势, 可能是因为桉树林本身生长快速的特

点,在雨季大量吸取土壤中的水分与水中溶解态的 N,导致雨季土壤 C:N 高于旱季。不同植物群落土壤 C:P、N:P 在雨季绝大部分表现出增大的趋势,这主要与 C、N、P 3 种元素自身性质有关。在自然状态下,P 的化学特征与 N 不同,其非常稳定,能够吸附在土壤中,不易变化^[29],雨季微生物分解与淋洗作用,导致旱季上层土壤凋落物中积累的 C、N 元素进一步释放并通过土壤水文过程向下扩散,导致 C:P、N:P 的上升,并且雨季植被生长旺盛,对土壤 N 元素利用率升高,研究表明参与植物光合作用的 N 素效率提高,有助于土壤 N 的转化和积累^[30];而 P 元素含量偏低,并且结合其不易迁移与释放的特征,P 元素的缺乏可能成为该区域植被生长最主要的限制因子。

3.4 植物群落的土壤改良效应

相同群落条件下,植物群落对土壤不同层次的改良效应不一致,其中植物群落对土壤上层的影响最大,是植物群落凋落物分解转化的结果,而中下层土壤肥力又和土壤母质相关性大,植物群落对其土壤肥力的改良相对较差^[31]。基于这一点,通过分析发现不同植物群落对土壤的改良效应也表现出一定的差异性,其中对土壤上层改良效应的大小依次为:常绿阔叶林>荒坡灌草丛>针阔混交林>云南松林>桉树林,对荒坡灌草丛的改良效应之所以比针阔混交林和云南松林高,其原因可能和当地对针阔混交林和云南松林凋落物的去除有关。对土壤中层改良效应大小为:常绿阔叶林>桉树林>针阔混交林>荒坡灌草丛>云南松林,其中桉树林对中层的改良效应较大的原因目前还不清楚。桉树林作为当地的一种经济林,一直是滇中地区种植最多的人工林,通过本研究发现虽然桉树林上层的侵蚀程度较大,从而造成桉树林土壤上层的肥力小于其他群落,但是其土壤中层的肥力要强于其他群落,尤其是对磷素的保持,如果从整个土壤剖面的综合肥力看,桉树林的综合肥力要比云南松林高,和荒坡灌草丛的肥力大体相近,但是由于土壤上层的水土保持能力差,使得桉树林在生态恢复中的作用得到极大的争议,因此,研究桉树与其他树种的配合种植对土壤上层的保持效应是一个值得研究的课题,并以此解决水土保持和经济效益间的矛盾。而作为云南本地植物的云南松林,却表现为土壤综合养分较低,可能原因为云南松作为针叶树种,其凋落物相对荒坡灌草丛和阔叶林而言,分解速率较慢,导致养分积累较少;另外,云南松林林下群落覆盖度较低,存在较严重的水土流失现象^[1],致使部分养分流失,

进一步减少了云南松林养分的积累。因此,结合不同群落对土壤养分的影响及其计量比特征,建议滇中脆弱区适当控制云南松林及桉树林的种植面积,通过对云南松林的抚育增加其中阔叶树种的比例,以此增加植物群落对土壤养分的改善效益,进而减少水土流失的风险,为滇中生态修复提供一定的基础条件。

4 结论

不同植物群落对土壤养分的影响在空间及时间上均具有一定的影响。从空间尺度来看,除全钾含量外,植物群落对上层土壤的改良效益较高,导致表层土壤养分明显高于中下层;从时间尺度看,除常绿阔叶林雨季肥力略有下降外,其他 4 种群落雨季的综合肥力均比旱季有所增加。总体看来,常绿阔叶林对土壤养分的影响改良效益最高,而云南松林对土壤养分的改良效益最低。基于土壤养分化学计量比分析,土壤氮、磷养分是限制植物群落发展的主要因子。因此,从不同群落对土壤养分的影响及其生态水文过程上差异的角度出发,建议在滇中脆弱区的生态修复过程中,尽量控制桉树林的种植面积,并对云南松林进行抚育增加其中阔叶树种的比例,以此增加植物群落对土壤养分的改善效益,进而减少水土流失的风险。为当地树种的选择,从土壤养分变化的角度提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 李博, 阎凯, 付登高, 等. 滇中地区 4 种覆被类型地表径流的氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 50-55.
- [2] 王震洪, 段昌群, 文传浩, 等. 滇中三种人工林群落控制土壤侵蚀和改良土壤效应[J]. 水土保持通报, 2001, 21(2): 23-27.
- [3] 高丽倩, 赵允格, 许明祥, 等. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 678-688.
- [4] 徐波, 朱忠福, 李金洋, 等. 九寨沟国家自然保护区不同森林类型土壤养分特征[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5): 767-772.
- [5] 薛敬意, 唐建维, 沙丽清, 等. 西双版纳望天树林土壤养分含量及其季节变化[J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 373-379.
- [6] 张玲, 王震洪. 云南牟定三种人工林森林水文生态效应的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 69-73.
- [7] 王震洪, 段昌群, 文传浩, 等. 牟定城区面山三种人工林群落比较水文生态学研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2001, 23(2): 153-158.
- [8] 范太云, 韦敏, 宋运聪, 等. 滇中桉树人工林群落比较分析[J]. 四川林业科技, 2012, 33(6): 35-39.

- [9] Li Y, Li B, Zhang X, et al. Differential water and soil conservation capacity and associated processes in four forest ecosystems in Dianchi Watershed, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70(3): 198–206.
- [10] 吴晋霞. 滇中高原云南松林保育土壤功能研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2014.
- [11] 王倩, 王云琦, 马超, 等. 缙云山针阔混交林碳通量变化特征及影响因子研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 565–576.
- [12] 秦倩倩, 王海燕, 李翔, 等. 东北天然针阔混交林凋落物磷素空间异质性及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4519–4529.
- [13] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(1): 1–5.
- [14] Ågren G I, Bosatta E. Theoretical ecosystem ecology: understanding element cycles [M]. Cambridge University Press, 1998.
- [15] Cong W F, van Ruijven J, Mommer L, et al. Plant species richness promotes soil carbon and nitrogen stocks in grasslands without legumes[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(5): 1163–1170.
- [16] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [17] 蒋云东, 荷蓉. 灰色关联分析在杉木人工林土壤肥力研究中的应用[J]. *云南林业科技*, 1998(2): 34–38.
- [18] Tessema Z K, Belay E F. Effect of tree species on understory vegetation, herbaceous biomass and soil nutrients in a semi-arid savanna of Ethiopia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2017, 139: 76–84.
- [19] Yao Y F, Shao M G, Jia Y H, et al. Distribution of soil nutrients under and outside tree/shrub canopies on a revegetated loessial slope[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2017: CJSS–2017–0013.
- [20] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 111.
- [21] 李佳雨, 林家怡, 裴晨羽, 等. 桉树种植对林地土壤丛枝菌根真菌群落结构及多样性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2723–2731.
- [22] 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 等. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 231–237.
- [23] 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[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1345–1355.
- [24] 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[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139–151.
- [25] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 68–76, 82.
- [26] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 1–8.
- [27] 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.
- [28] 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[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [29] Xue Q Y, Dai P B, Sun D S, et al. Effects of rainfall and manure application on phosphorus leaching in field lysimeters during fallow season[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(9): 1527–1537.
- [30] Li Z W, Liu C, Dong Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 1–9.
- [31] 侯永平, 段昌群, 何锋. 滇中高原不同植被恢复条件下土壤肥力和水分特征研究[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 49–53.