

DOI: 10.5846/stxb201911152461

何高迅,王越,彭淑娴,郭兆来,刘嫦娥,付登高,段昌群.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征.生态学报,2020,40(13):4425-4435.

He G X, Wang Y, Peng S X, Guo Z L, Liu C E, Fu D G, Duan C Q. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13):4425-4435.

## 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征

何高迅<sup>1,2</sup>, 王越<sup>1,2</sup>, 彭淑娴<sup>1,2</sup>, 郭兆来<sup>1,2</sup>, 刘嫦娥<sup>1,2</sup>, 付登高<sup>1,2</sup>, 段昌群<sup>1,2,\*</sup>

1 云南大学生态与环境学院, 昆明 650091

2 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091

**摘要:** 植被恢复对土壤营养元素的存赋及其生态化学计量特征的影响广受关注, 为了深入了解不同植被恢复类型下土壤碳、氮、磷储量与生态化学计量特征, 选择滇中地区退化山地飒马场流域具有代表性的 4 种不同修复阶段的典型植被(荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林和次生常绿阔叶林)为研究对象, 分析了不同植被类型下不同深度土壤中有有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)储量和化学计量变化特征。结果表明, 退化山地的植被恢复显著改变土壤碳氮磷储存能力和化学计量比, 这种改变作用整体上随土壤深度增加而降低。其中, 在 0—60 cm 土层上, SOC 储量在次生常绿阔叶林最高, 达 123.41 t/hm<sup>2</sup>, 其次是针阔混交林(115.69 t/hm<sup>2</sup>)和云南松林(93.08 t/hm<sup>2</sup>), 荒坡灌草丛(89.56 t/hm<sup>2</sup>)最低; TN 储量针阔混交林(4.91 t/hm<sup>2</sup>) > 次生常绿阔叶林(4.58 t/hm<sup>2</sup>) > 云南松林(4.43 t/hm<sup>2</sup>) > 荒坡灌草丛(3.98 t/hm<sup>2</sup>), 4 种植被类型间差异显著; TP 储量云南松林最高(2.57 t/hm<sup>2</sup>), 次生常绿阔叶林(2.2 t/hm<sup>2</sup>)最低; 4 种植被类型下土壤 C/N 介于 15.77—30.18, C/P 介于 29.24—65.33, N/P 介于 1.28—2.68 之间, 在 0—60 cm 土层上均以次生常绿阔叶林最高。植被类型和土壤深度及其交互作用显著影响研究区的 SOC、TN 和 TP 储量和化学计量比。分析认为, 退化山地不同植被类型对土壤碳氮磷储量和化学计量的影响过程复杂, 修复演替进入到次生常绿阔叶林阶段土壤理化性质显著提升, 该地区植被修复主要受到氮的限制。研究表征了滇中退化环境植被恢复过程中土壤主要元素变化特征, 为揭示植被恢复与土壤生态功能演变关系提供数据支持。

**关键词:** 土壤养分; 土壤化学计量学; 植被恢复; 退化山地; 滇中地区

## Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China

HE Gaoxun<sup>1,2</sup>, WANG Yue<sup>1,2</sup>, PENG Shuxian<sup>1,2</sup>, GUO Zhaolai<sup>1,2</sup>, LIU Change<sup>1,2</sup>, FU Denggao<sup>1,2</sup>, DUAN Changqun<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Ecology & Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Kunming 650091, China

**Abstract:** The effects of vegetation restoration on soil nutrient elements and their ecological stoichiometry are receiving increasing attention. In order to understand the characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus storage and eco-chemical stoichiometry under different types of restoration, four representative restoration stages in Samachang watershed in the degraded mountainous area of central Yunnan, China were selected among typical vegetation (shrubland, yunnan pine

基金项目: 国家自然科学基金(31670522, 31860133); 云南省重点研发专项(2019BC001, 2018BC001)

收稿日期: 2019-11-15; 修订日期: 2020-05-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chqduan@ynu.edu.cn

forests, mixed coniferous and broad-leaved forests, and secondary evergreen broad-leaved forests), and the changes of soil organic carbon(SOC), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP) stocks and stoichiometry in soils with different soil depths were analyzed under different vegetation types. The results showed that the types of vegetation restoration have significant effects on soil SOC, TN, TP stocks and stoichiometric ratios. Vegetation restoration significantly changes soil carbon, nitrogen, and phosphorus storage capacity and stoichiometry, and overall decreases with increasing depth. At 0—60 cm of soil, organic carbon stocks are the highest in secondary evergreen broad-leaved forests, reaching 123.41 t/hm<sup>2</sup>, followed by mixed coniferous and broad-leaved forests (115.69 t/hm<sup>2</sup>) and Yunnan pine forests (93.08 t/hm<sup>2</sup>), and shrubland(89.56 t/hm<sup>2</sup>) is the lowest. Total nitrogen stocks are in the order of mixed coniferous and broad-leaved forests(4.91 t/hm<sup>2</sup>)>secondary evergreen broad-leaved forests(4.58 t/hm<sup>2</sup>)>Yunnan pine forests(4.43 t/hm<sup>2</sup>)> shrubland(3.98 t/hm<sup>2</sup>). There are significant differences of TN stocks among 4 vegetation types. Total phosphorus stocks in yunnan pine forests are the highest(2.57 t/hm<sup>2</sup>), and the secondary evergreen broad-leaved forest(2.2 t/hm<sup>2</sup>) presents the lowest value. The soil C/N under the 4 types of plant cover varies from 15.77 to 30.18, C/P ranging from 29.24 to 65.33, and N/P ranging from 1.28 to 2.68. The secondary evergreen broad-leaved forests shows the highest on the 0—60 cm soil layers. The analysis showed that the influence of different vegetation types on soil carbon, nitrogen, and phosphorus storage and stoichiometry is a complex ecological process. Vegetation restoration significantly changes soil carbon, nitrogen, and phosphorus storage capacity and stoichiometry, but the overall trends go down with the increasing soil depth, and the best physical and chemical properties of soil are represented in the secondary evergreen broad-leaved forests. The growth of vegetation in this area is mainly restricted by nitrogen shortage. The results of this study characterize the features of soil major element changes in the process of vegetation restoration in the degraded mountainous area of central Yunnan, and contribute informative support for revealing the relationship between vegetation restoration and soil ecological function evolution.

**Key Words:** soil nutrient; soil stoichiometry; vegetation restoration; degraded mountainous area; central Yunnan Province

土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)是土壤主要营养成分,是土壤肥力和生产力的重要指标,在陆地生态系统中调节植物生长和养分循环方面发挥着关键作用<sup>[1]</sup>。这些物质及其元素在土壤各层之间不断循环,维持整个生态系统的稳定<sup>[2]</sup>,因此它们的储量和化学计量特征,反映了土壤向植被提供养分的潜力。植物与土壤特性之间密切相关<sup>[3]</sup>,土壤C、N、P比值直接反映了土壤肥力,间接表明了植物的营养状况<sup>[4]</sup>,长期以来,土壤碳氮磷化学计量特征被广泛地作为一类重要参数来推进我们对地面植物群落与土壤养分特征之间相互作用的理解<sup>[5-7]</sup>,甚至于用来认知生态过程对全球变化的响应<sup>[8]</sup>。因此,了解土壤中C、N、P储量及其随植被修复过程的化学计量变化,对于评价修复过程中土壤养分状况和可持续发展具有重要意义<sup>[4,9]</sup>。

植被恢复因其关联全球气候变化、碳氮循环、水土保持、土壤质量改善和区域经济发展而受到广泛关注<sup>[10-11]</sup>,大量相关研究表明,土壤SOC、TN和TP的储量和化学计量比与植被恢复类型密切相关<sup>[9,12]</sup>,土壤C:N:P化学计量学对植被变化的响应相当复杂,主要取决于气候特征、土壤初始养分状况和植被类型<sup>[9,13-14]</sup>,土壤中的C、N和P储量和化学计量变化可能影响植物群落的物种组成<sup>[15]</sup>,而植被可通过凋落物和根系分泌物的输入影响土壤C、N、P养分循环和化学计量,导致土壤养分浓度的差异<sup>[16]</sup>。不同植物群落对土壤性质的影响有差异,一些研究发现,植被恢复可以促进光合作用、土壤养分积累和微生物活性<sup>[17-18]</sup>,提高土壤SOC、TN和TP的化学计量比<sup>[19-20]</sup>,而其他研究表明土地利用及其植被变化会导致土壤养分含量的下降<sup>[21-22]</sup>。因此,了解不同植被恢复类型土壤碳氮磷化学计量学特征是管理植被恢复的关键。

我国滇中地区地处长江上游的金沙江流域,是我国南方水土保持和生态恢复的关键区域。历史上这里人口密集,人为扰动突出,极大地改变了区域植被类型和植被覆盖格局,特别是20世纪50年代大面积的地带性植被遭破坏殆尽,由人类引起的土地覆被变化导致生物多样性丧失和严重的水土流失,生态系统及土壤质量

持续退化<sup>[23-24]</sup>。为了控制水土流失和改善生态系统功能,在过去的几十年里,主要采用“飞播造林”和“退耕还林”的植被恢复工程来改善生态环境,经过人工促进自然恢复形成 4 种典型的植被类型,生态环境得到了改善<sup>[25-26]</sup>。以往针对该区域植被恢复的研究主要集中在水土流失<sup>[24]</sup>、生态水文<sup>[27]</sup>、生态系统服务<sup>[25]</sup>和面源污染输出<sup>[26]</sup>等方面,但针对退化环境植被恢复过程中的土壤碳氮磷化学计量特征少见系统研究。本研究选择滇中地区典型小流域飒马场呈恢复演替系列的 4 种代表植被恢复类型(荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林和次生常绿阔叶林)为研究对象,研究不同植被恢复类型对土壤 SOC、TN 和 TP 的储量和化学计量特征的影响,以期对长江上游退化环境的植被恢复及其生态功能修复过程的认识提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于滇中高原楚雄州牟定县的飒马场流域(25°24'09"N;101°28'18"E),是长江上游水土保持重点防治区域。该区域属于金沙江中游云贵高原腹地,山地海拔 2100—2200 m,年平均气温为 16℃,年平均降雨量为 800—1000 mm,雨季为每年 5—10 月,属亚热带半湿润季风气候,土壤为紫色土,成土母岩为紫色砂页岩。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,20 世纪 50 年代大面积的地带性植被遭破坏殆尽,后来经过人工促进自然恢复形成 4 种典型的植被类型:荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林和次生常绿阔叶林,4 种植被类型总面积占小流域总面积的 50%以上。荒坡灌草丛在 20 世纪 90 年代末期坡耕地撂荒基础上自然恢复所形成,云南松林是 20 世纪 60 年代末进行飞机播种所形成的人工林,针阔混交林是在飞机播撒的云南松种子和次生演替的影响下形成的植物群落,而次生常绿阔叶林是 20 世纪 50 年代原生植被破坏后经过次生演替所形成。飒马场流域是滇中典型生态退化区,植被类型和生态恢复模式多样,作为云南大学生态学研究长期定位监测点,2001 年便建设系列径流小区观测水土流失情况,具有长期定位观测基础。因此成为研究滇中生态退化区不同植被恢复下土壤碳氮磷生态化学计量特征的理想之地。

### 1.2 样地调查与样品分析

为了研究不同植被恢复后土壤 SOC、TN 和 TP 储量和化学计量的变化特征,选择在该区域刚进入雨季、群落水肥条件处于高度胁迫阶段进行调查和取样分析。样地为 2001 年建成的彼此临近、坡度、坡向和土壤母质等基本一致的 4 种典型植被类型下 10 m×40 m 的标准径流小区,每个植被类型设置了 3 个重复样地,间隔 300 m 以上,样地基本情况见表 1。在每个样地利用 S 形 5 点采样,按照挖剖面法从不同土壤深度(0—20、20—40、40—60 cm)中采取土壤样品,同时采用环刀(100 cm<sup>3</sup>)进行原位土采样。将同一深度的土壤样本进行混合,去除石块、植物根系和其他杂质后装袋带回实验室,自然风干并研磨过筛,用于土壤理化指标的测定。土壤容重和总孔隙度等土壤物理性状指标采用环刀法测定<sup>[28]</sup>,pH 值采用电位法(土水比 1:2.5),含水率采用烘干法,用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>法测定土壤 SOC,土壤 TN 用半微量凯氏定氮法测定,土壤 TP 选择 HClO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消解后用钼锑抗比色法测定<sup>[29]</sup>。

### 1.3 土壤 SOC、TN 和 TP 储量的计算

按照 Guo 等人总结的方法<sup>[30]</sup>,土壤有机碳、全氮和全磷储量(密度)(t/hm<sup>2</sup>)按如下公式计算:

$$\text{SOC}_{i\text{Stock}} = \text{SOC}_i \times \text{BD}_i \times D_i / 10 \quad (1)$$

$$\text{TN}_{i\text{Stock}} = \text{TN}_i \times \text{BD}_i \times D_i / 10 \quad (2)$$

$$\text{TP}_{i\text{Stock}} = \text{TP}_i \times \text{BD}_i \times D_i / 10 \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^n C_i \times \text{BD}_i \times D_i / 10 \quad (4)$$

式中,SOC<sub>*i*</sub>是土壤第 *i* 层的有机碳含量(g/kg),TN<sub>*i*</sub>是土壤第 *i* 层的土壤全氮含量(g/kg),TP<sub>*i*</sub>是土壤第 *i* 层的土壤全磷含量(g/kg),BD<sub>*i*</sub>是土壤第 *i* 层的土壤容重(g/cm<sup>3</sup>),D<sub>*i*</sub>是土壤第 *i* 层的土壤深度(cm),S 表示土壤 0—60 cm 层的碳氮磷储量(t/hm<sup>2</sup>),C<sub>*i*</sub>表示第 *i* 层土壤碳氮磷含量(g/kg)。

表 1 研究区样地概况

Table 1 General information of study plots

植被类型 Vegetation type	海拔 Altitude/m	林龄 Stand age/a	优势种 Dominant species	平均株高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	林木密度 Forest density/ (株/m <sup>2</sup> )	盖度 Coverage	物种丰富度 Species richness
KY	2135±5	50—60	滇青冈( <i>Cyclobalanopsis glaucooides</i> )、 滇油杉( <i>Keteleeria evelyniana</i> )	6.99±3.41	7.88±2.90	0.68±0.30	0.82±0.37	23
ZK	2135±5	40—50	滇油杉( <i>Keteleeria evelyniana</i> )、 云南松( <i>Pinus yunnanensis</i> )、 滇青冈( <i>Cyclobalanopsis glaucooides</i> )	7.14±2.12	10.28±2.63	0.42±0.27	0.85±0.25	14
YNS	2160±10	40—50	云南松( <i>Pinus yunnanensis</i> )	8.18±1.46	11.85±2.72	0.26±0.10	0.57±0.13	9
HCP	2160±10	10—20	云南松( <i>Pinus yunnanensis</i> )幼树、 滇油杉( <i>Keteleeria evelyniana</i> )幼树、 史密斯桉树( <i>Eucalyptus smithii</i> )幼树	—	—	—	0.69±0.14	12

KY, 次生常绿阔叶林 Secondary evergreen broad-leaved forests; ZK, 针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forests; YNS, 云南松林 Yunnan pine forests; HCP, 荒坡灌草丛 Shrubland; DBH: 胸径 Diameter Breast Height

## 1.4 统计分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件对数据进行处理,应用单因素方差分析(One-Way ANOVA)的 LSD 法对不同植被类型理化性质和碳氮磷储量及化学计量比进行显著性检验( $\alpha = 0.05$ ),土壤理化性质与碳氮磷储量和比值之间的相关性采用 Pearson 分析。采用双因素方差分析(Two-Way ANOVA)研究了植被类型和土壤深度及其相互作用对土壤理化性质和土壤 SOC、TN、TP 储量和 C/N、C/P 和 N/P 比值的影响( $P = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型土壤理化性质

不同植被类型及其不同土层的土壤理化性质见表 2 所示,从表中可以看出,随着土壤深度的增加,土壤 pH 和土壤容重逐渐增大,而土壤含水率、土壤总孔隙度、SOC、TN 和 TP 含量整体随土壤深度增加而减小。次生常绿阔叶林 pH 值显著低于其他 3 种植被类型,在 0—20 cm 层最低(4.51);土壤含水率在不同植被类型间无显著差异;土壤容重在云南松林 40—60 cm 层最大(1.49 g/cm<sup>3</sup>),荒坡灌草丛 0—20 cm 层最低(1.22 g/cm<sup>3</sup>);土壤总孔隙度在次生常绿阔叶林 0—20 cm 层最大(48.75%),云南松林 40—60 cm 层最低(37.95%),在荒坡灌草丛随土层加深而增大。

土壤碳氮磷含量在同一植被不同土层和同一土层不同植被间存在显著差异(表 2),SOC、TN 和 TP 含量最高值均出现在针阔混交林的 0—20 cm 层,分别为 20.8、0.79、0.36 g/kg;SOC 和 TN 最低值均在云南松林 40—60 cm 层(9.87、0.42 g/kg),而 TP 含量在次生常绿阔叶林 0—20 cm 层(0.26 g/kg)最低。4 种植被类型土壤 SOC 含量在 9.58—21.33 g/kg 之间,变异系数为 0.25;TN 含量在 0.42—0.82 g/kg 之间,变异系数为 0.21;TP 含量介于 0.24—0.27 g/kg 之间,变异系数仅 0.11,碳氮磷含量变异程度表现为 C>N>P。植被类型和土壤深度极显著影响土壤 pH、容重、总孔隙度、SOC、TN 和 TP( $P < 0.01$ ),两者之间的交互作用极显著影响 pH、SOC、TN 和 TP( $P < 0.001$ )(表 3)。

### 2.2 不同植被类型土壤碳、氮、磷储量和化学计量特征

不同植被类型土壤碳氮磷储量和化学计量特征见表 4 和图 1 所示,从表 4 可以看出,在 0—60 cm 土层上,4 种植被类型的碳氮磷储量和化学计量比存在显著差异( $P < 0.05$ ),土壤 SOC 储量在次生常绿阔叶林(123.41 t/hm<sup>2</sup>)最高,显著高于针阔混交林(115.69 t/hm<sup>2</sup>)和云南松林(93.08 t/hm<sup>2</sup>),荒坡灌草丛(89.56 t/hm<sup>2</sup>)最低,云南松林和荒坡灌草丛间无显著差异;土壤 TN 储量表现为针阔混交林(4.91 t/hm<sup>2</sup>)>次生常绿阔叶林(4.58 t/hm<sup>2</sup>)>云南松林(4.43 t/hm<sup>2</sup>)>荒坡灌草丛(3.98 t/hm<sup>2</sup>),4 种植被类型间差异显著;而 TP 储量

在云南松林最大,为 2.57 t/hm<sup>2</sup>,显著高于其他 3 种植被类型,次生常绿阔叶林最低,为 2.2 t/hm<sup>2</sup>,次生常绿阔叶林、针阔混交林和荒坡灌草丛之间无显著差异。C/N、C/P 和 N/P 最高的均是次生常绿阔叶林,分别是 27.22、56.16 和 2.08,其中,C/N 和 C/P 显著高于其他植被类型,而 N/P 只与荒坡灌草丛间差异显著。C/N 和 C/P 最低的是云南松林,分别为 21.36 和 36.92,N/P 最低的为荒坡灌草丛,为 1.71。

表 2 4 种植被类型土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil of 4 vegetation types

植被类型 Vegetation type	土壤深度 Soil depth/cm	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	pH	含水率 Moisture content/%	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	土壤总 孔隙度 Soil total porosity/%
KY	0—20	18.44±1.37Ab	0.74±0.01Ab	0.29±0.02Ac	4.51±0.02Cc	19.26±1.21Aa	1.29±0.2Aa	48.75±2.88Aa
	20—40	14.41±0.72Ba	0.5±0Bb	0.27±0.01ABb	4.86±0.01Bc	18.06±1.38Aa	1.35±0.03Ab	41.74±1.1Bab
	40—60	13.41±0.11Ba	0.48±0Ca	0.26±0.02Bb	4.93±0.02Ac	18.55±1.8Aa	1.38±0.06Aab	44.8±3.39ABa
ZK	0—20	20.8±0.58Aa	0.79±0.03Aa	0.36±0.01Aa	4.98±0.02Ab	18.86±0.63Aa	1.25±0.12Aa	47.85±3.63Aa
	20—40	13.58±0.16Bb	0.62±0.02Ba	0.28±0.01Bb	4.91±0.02Bb	18.71±0.59Aa	1.29±0.06Ab	43.72±1.1Aab
	40—60	10.14±0.51Cbc	0.47±0.02Ca	0.27±0.01Bb	5.00±0.03Ab	18.17±0.56Aa	1.41±0.13Aab	42.76±2.72Aab
YNS	0—20	12.95±1.9Ac	0.71±0Ac	0.29±0.02Ac	5.04±0.05Aa	18.11±0.35Aab	1.27±0.02Ba	45.43±2.52Aa
	20—40	10.61±0.09Bd	0.48±0.02Bb	0.33±0.03Aa	4.99±0.02Aa	18.7±1.84Aa	1.46±0.08Aa	39.05±5.92Ab
	40—60	9.87±0.12Bc	0.42±0Cb	0.3±0.02Aa	5.05±0.02Aa	17.72±1.49Aa	1.49±0.07Aa	37.95±3.01Ab
HCP	0—20	13.17±0.24Ac	0.6±0Ad	0.33±0.02Ab	4.95±0Cb	16.69±1.36Ab	1.22±0.12Aa	46.06±3.26Aa
	20—40	11.65±0.02Bc	0.5±0.01Bb	0.32±0.02Aa	4.99±0.03Ba	17.64±1.71Aa	1.28±0.01Ab	47.43±1.89Aa
	40—60	10.68±0.32Cb	0.47±0.01Ca	0.28±0.01Bab	5.05±0.01Aa	18.71±2.17Aa	1.29±0.09Ab	47.59±2.44Aa
变异系数 Variable coefficient	—	0.25	0.21	0.11	—	—	—	—

不同大写字母表示同一植被不同深度之间存在显著差异( $P<0.05$ ),不同小写字母表示同一深度不同植被之间存在显著差异( $P<0.05$ )

同一植被类型不同土层和同一土层不同植被类型间的土壤碳氮磷储量和化学计量比差异显著( $P<0.05$ ) (图 1),土壤 SOC 和 TN 储量及 C/P 比和 N/P 比整体上随土层加深而显著降低,C/N 比在云南松林 0—20 cm 层最低,仅 18.23,TP 储量除云南松林 0—20 cm 层显著低于其他层外,整体也随土层加深而降低。整体而言,植被类型和土壤深度及其交互作用均对土壤碳氮磷储量和化学计量比有极显著的影响( $P<0.001$ ,其中土壤深度对 TP 储量无显著影响)(表 3)。

### 2.3 不同植被类型土壤 C、N、P 储量及生态化学计量比与土壤理化性质的相关性

不同植被类型土壤 C、N、P 储量及生态化学计量比与土壤理化性质之间的相关性见表 5 所示,由表可知,土壤 SOC 储量与 SOC 含量和 TN 含量极显著正相关( $P<0.01$ ,下同),相关系数分别为 0.979 和 0.746,与土壤总孔隙度显著正相关( $P<0.05$ ,下同),与 pH 值极显著负相关;TN 储量与 SOC 含量和 TN 含量极显著正相关,相关系数分别为 0.821 和 0.977,与土壤总孔隙度和 TP 含量显著正相关,与土壤容重和 pH 值显著负相关;而 TP 储量除与 TP 含量极显著正相关(相关系数为 0.827)外,与其他理化性质均没有相关性。C/P 与土壤总孔隙度、SOC 含量和 TN 含量极显著正相关,与 pH 值极显著负相关,与土壤容重显著负相关;C/N 与 SOC 含量极显著正相关,与 pH 显著负相关;N/P 与土壤总孔隙度、SOC 含量和 TN 含量极显著正相关,与土壤容重和 pH 值极显著负相关。土壤含水率与碳氮磷储量和化学计量比均无相关性。

## 3 讨论

### 3.1 植被类型对土壤碳氮磷含量和储量的影响

土壤养分储量能够体现土壤生产力的高低和土壤质量的好坏<sup>[31]</sup>。研究区的土壤 SOC 储量在 89.56—

表 3 植被类型和土壤深度与土壤理化性质、C:N:P 储量及化学计量比的双因素方差分析  
Table 3 Two-way ANOVA on the effects of vegetation type and soil depth on soil Physico-chemical Properties, C:N:P stocks and stoichiometry.

因素 Factors	土壤容重 Soil bulk density	含水率 Moisture content	pH	土壤 总孔隙度 Soil total porosity	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	F 值 F value					
								有机碳 储量 Organic carbon stock	全氮储量 Total nitrogen stock	全磷储量 Total phosphorus stock	C/P	C/N	N/P
A	3.201 *	0.908	241.743 ***	6.483 **	72.192 ***	112.005 ***	8.044 **	73.928 ***	125.11 ***	12.32 ***	78.634 ***	38.273 ***	22.789 ***
B	5.973 ***	0.006	113.893 ***	8.448 **	157.971 ***	1164.4 ***	18.554 ***	93.03 ***	684.487 ***	2.172	45.489 ***	3.529 *	80.465 ***
A×B	0.624	0.927	72.057 ***	1.064	19.239 ***	38.138 ***	8.582 ***	18.176 ***	23.16 ***	12.495 ***	5.221 **	11.382 ***	13.615 ***

A 表示植被类型 Vegetation types, B 表示土壤深度 Soil depth, A×B 表示植被类型和土壤深度的交互作用; \* 表示  $P<0.05$  的显著性; \*\* 表示  $P<0.01$  的显著性; \*\*\* 表示  $P<0.001$  的显著水平

表 4 不同植被类型 0—60 cm 土层土壤碳氮磷储量及化学计量比  
Table 4 Soil nutrient element content and chemical measurement ratio of soil in 0—60 cm soil layer of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	土壤 总孔隙度 Soil total porosity	有机碳储量 Organic carbon stock/ (t/hm <sup>2</sup> )		全氮储量 Total nitrogen stock/ (t/hm <sup>2</sup> )		全磷储量 Total phosphorus stock/ (t/hm <sup>2</sup> )		C/P	C/N	N/P
					有机碳 储量 Organic carbon stock	全氮 储量 Total nitrogen stock	有机碳 储量 Organic carbon stock	全氮 储量 Total nitrogen stock	有机碳 储量 Organic carbon stock	全磷 储量 Total phosphorus stock			
KY	15.42±2.43a	0.57±0.12a	0.27±0.02b	0.27±0.02b	123.41±5.63a	4.58±0.03b	2.2±0.11b	27.22±2.08a	56.16±6.1a	2.08±0.35a			
ZK	14.84±4.73a	0.63±0.14a	0.3±0.04ab	0.3±0.04ab	115.69±2.63b	4.91±0.03a	2.37±0.01b	23.26±2.47b	48.29±8.88b	2.07±0.24a			
YNS	11.14±1.69b	0.54±0.13a	0.3±0.03ab	0.3±0.03ab	93.08±4.26c	4.43±0.05c	2.57±0.14a	21.36±2.78b	36.92±6.73c	1.78±0.54ab			
HCP	11.83±1.11b	0.52±0.06a	0.31±0.03a	0.31±0.03a	89.56±1.33c	3.98±0.05d	2.33±0.09b	22.64±0.74b	38.6±2.68c	1.71±0.14b			

有机碳、全氮和全磷含量为 3 个土层相加后算平均值, 储量为 0—60 cm 深度总储量; 同列不同小写字母表示不同植被类型间差异显著 ( $P<0.05$ )

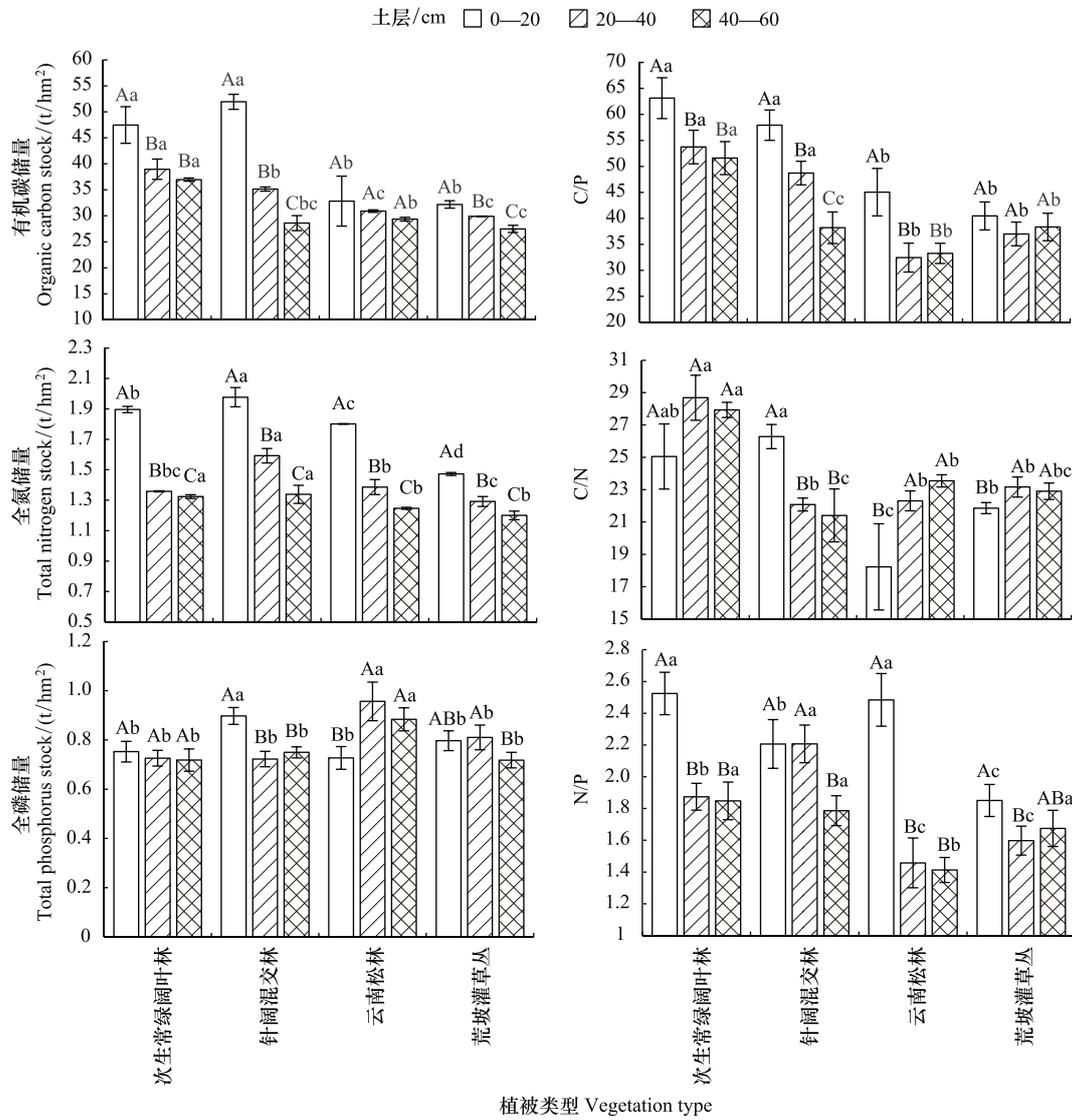


图 1 4 种植被类型土壤碳氮磷储量和化学计量特征

Fig.1 soil carbon, nitrogen and phosphorus stock and stoichiometry characteristics of 4 vegetation types

不同大写字母表示同一植被不同深度之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一深度不同植被之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

表 5 研究区土壤理化性质与 C:N:P 储量和计量比的相关性分析

Table 5 Correlation between the different soil physico-chemical properties and C:N:P stocks and stoichiometry in the Study Area

组分 Items	土壤容重 Soil bulk density	含水率 Moisture content	pH	总孔隙度 Total porosity	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus
有机碳储量 Organic carbon stock	-0.314	0.244	-0.586 **	0.404 *	0.979 **	0.746 **	0.317
全氮储量 Total nitrogen stock	-0.379 *	0.212	-0.462 **	0.409 *	0.821 **	0.977 **	0.353 *
全磷储量 Total phosphorus stock	0.302	-0.077	0.239	-0.268	0.028	-0.037	0.827 **
C/P	-0.398 *	0.253	-0.698 **	0.453 **	0.880 **	0.682 **	-0.112
C/N	0.001	0.107	-0.335 *	0.091	0.472 **	-0.090	-0.032
N/P	-0.462 **	0.208	-0.541 **	0.445 **	0.659 **	0.856 **	-0.148

\* 表示  $P < 0.05$  的显著性; \*\* 表示  $P < 0.01$  的显著性

123.41 t/hm<sup>2</sup>之间,低于我国和全球森林土壤平均值(293.55、189.55 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[32]</sup>,而 TN 储量(3.98—4.91 t/hm<sup>2</sup>)远远低于我国森林土壤平均值(34.64 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[33]</sup>。飒马场流域植被恢复过程中,处于当地演替顶级的次生常绿阔叶林土壤 SOC 和 TN 储量(123.41、4.58 t/hm<sup>2</sup>)低于相同气候类型的滇中高原磨盘山常绿阔叶林碳氮储量(219.21、6.39 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[33]</sup>;土壤 TP 储量在 2.2—2.57 t/hm<sup>2</sup>之间,略高于滇中磨盘山(0.71—2.0 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[33]</sup>,远低于相同气候和土壤类型的四川截流堰小流域林地土壤 TP 储量(153 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[34]</sup>。有研究表明土壤元素含量和储量与气候、海拔、土壤类型、植被类型和林龄和人为活动等因素有关<sup>[4,33,35]</sup>,本研究中碳氮磷储量与全国或相同气候类型地区的差异可能与研究区独特的气候条件、成土作用特征和特定的地理位置有关。相对于全国或同类气候地区而言,本研究区植被恢复过程中碳氮磷储量相对较低,但与研究区 2007 年<sup>[36]</sup>相比,土壤碳氮储量均有所提高,土壤元素储量在很大程度上取决于土壤元素的含量<sup>[33]</sup>,本研究中碳氮储量与其含量极显著正相关(表 5),有研究表明,随着恢复年限的增加,植被恢复能够明显提高土壤 SOC 和 TN 的含量<sup>[35]</sup>。

植被主要通过凋落物分解、根系分泌、土壤矿化以及土壤动物和微生物的贡献影响土壤 C、N 和 P<sup>[16]</sup>,土壤 SOC 主要来源于地表枯落物、根分泌物和动植物残体<sup>[37]</sup>,土壤 TN 含量取决于土壤有机质的生物积累和水解作用<sup>[38]</sup>。随着演替的进行,土壤 SOC 和 TN 浓度增加,但 TP 浓度降低(图 1,表 4),这一结果表明,植被演替增加了 SOC 和 TN 的浓度和储量,与其他研究结果一致<sup>[33,39-40]</sup>。随着植被演替的进行,林木密度、物种丰富度和盖度逐渐增大(表 1),使得生物量和枯落物蓄积量增多<sup>[39,41]</sup>,促进了从凋落物和根系输入到土壤中的 SOC 和 TN 的积累<sup>[40]</sup>,前人对研究区的枯落物蓄积量和根生物量研究表明,随着演替的进行,枯落物和根生物量逐渐增加<sup>[24,41]</sup>。土壤 SOC 储量在云南松林和荒坡灌草丛间无显著差异,可能是随着恢复年限的增加,荒坡灌草丛中出现了较多的幼树,提高了生物量<sup>[41]</sup>。土壤 TP 主要来源于岩石风化,其含量受土壤母质、土地利用类型和生物地球化学过程的影响<sup>[16]</sup>,TP 浓度和储量随着演替的进行呈降低趋势,可能是由于随着演替进行植物群落物种丰富度逐渐增大(表 1)以及土壤中的 pH 值逐渐降低(表 2),导致植物生长对磷的需求增加<sup>[16]</sup>和较低的 pH 值使得无机磷与土壤中的铝结合<sup>[42-43]</sup>,从而降低了土壤中的磷循环,与 Gao 等人<sup>[16]</sup>的研究一致。此外,有研究表明碳氮磷含量还与土壤机械组成有关,与粘粉粒含量正相关,与沙粒含量负相关<sup>[44]</sup>,前人对研究区土壤机械组成的研究结果显示,次生常绿阔叶林的粘粒和粉粒最高,而荒坡灌草丛的沙粒比例最大<sup>[45]</sup>,与本研究中碳氮储量变化一致。研究结果表明,随着演替的进行,植被恢复显著提高土壤碳氮储量,对土壤有机碳的积累和改善土壤结构具有积极作用。

### 3.2 植被类型对土壤碳氮磷化学计量变化的影响

土壤碳氮磷化学计量特征是表征土壤肥力和养分循环变化的有用指标<sup>[12]</sup>。土壤碳氮主要通过影响微生物活性来影响有机质分解速率,进而影响土壤 C、N 循环<sup>[37]</sup>,以往的研究表明,C/N 与有机质分解速率呈负相关<sup>[46]</sup>,在本研究中,C/N 与 SOC 含量显著正相关(表 5)。研究区土壤 C/N 的范围在 15.77—30.18 之间,高于我国和全球土壤 C/N 平均水平(10—12, 14.3)<sup>[47]</sup>,是气候条件相似的滇中磨盘山(5.35—16.42)<sup>[7]</sup>的 2—3 倍,表明研究区土壤有机质的分解速率较慢,养分循环的速度被限制,有利于有机物的积累。土壤 C/P 是表征土壤的磷素有效性的指标<sup>[48]</sup>,可以衡量微生物对土壤有机质的矿化,本研究中,4 种植被类型下土壤 C/P 平均值为 45.1,低于全国平均值(61)<sup>[49]</sup>和同气候类型的滇南地区(82.69—155.87),有研究表明低的 C/P 能够帮助微生物对有机质的分解,增加养分释放量<sup>[50]</sup>,意味着该地区土壤磷表现为净矿化,土壤磷有效性较高。土壤氮磷是植物生长发育所必需的矿质养分,N/P 是养分限制的预测因子,同时也是 N 饱和的判断指标<sup>[51]</sup>,研究区土壤 N/P 介于 1.28—2.68 之间,低于我国和全球森林土壤平均水平(3.9, 5.9)<sup>[48]</sup>,远低于同气候类型的滇南泸西县喀斯特地区 N/P 比值(8.09—12.75)。有研究表明,当土壤 N/P < 10 时,植被生长受 N 限制<sup>[15]</sup>,说明该区域植被恢复过程中受到严重的土壤氮限制。不同地点土壤元素化学计量比不同与当地气候、土壤类型、植被组成类型和植被年龄等因素有关系<sup>[6,13,39]</sup>。

植被类型是影响碳氮磷化学计量比的重要因素<sup>[7,12]</sup>,本研究中,植被类型显著影响了土壤 C/N、C/P 和

N/P 比值(表 3),随着植被演替的进行,C/N、C/P 和 N/P 比值逐渐增大。影响 C/N 的主要原因是 SOC 含量(表 5),随着演替的进行,SOC 含量的增加率大于 TN 大于 TP(表 2),使得 C/N 逐渐增加,因此有机物的分解速率随植被演替的进行而增大。次生常绿阔叶林的 C/N 显著高于其他 3 种植被类型,与其植被盖度大,枯落物储量大,SOC 含量高于其他植被类型<sup>[24,39]</sup>有关,有研究表明土壤 C/N 与地上植被盖度具有极显著正相关性<sup>[52]</sup>。C/P 和 N/P 比值均在次生常绿阔叶林最大,分别是 56.16 和 2.08,与其较高的 SOC 和 TN 含量有关(表 4),土壤 C/P 和 N/P 的比值与土壤中的 SOC 和 TN 含量极显著正相关(表 5),但均低于相同气候类型的湖南大山冲森林公园土壤 C/P(70.9)和 N/P(6.2)比值<sup>[39]</sup>。研究区土壤 C/P 和 N/P 比值变化趋势与曾全超等<sup>[53]</sup>和 Ouyang 等<sup>[39]</sup>的研究结果一致,与刘万德等<sup>[54]</sup>的研究结果相反,主要是由于各个地点的 SOC 和 TN 含量存在差异。

### 3.3 土壤碳氮磷储量和化学计量特征随土壤深度的变化

土壤深度是影响土壤 SOC、TN 和 TP 储量和化学计量特征的重要因素<sup>[2,9,39]</sup>。本研究中,土壤深度显著影响了碳氮磷的浓度和储量(TP 储量除外,表 3),与大多数人的研究结果一致<sup>[19,33,39]</sup>,4 种植被类型碳氮磷储量整体随深度增加而降低,表土(0—20 cm)显著高于底土(40—60 cm)(云南松林除外,表 2,图 1)。主要原因是表层土壤受外部环境因素、土壤微生物和地面凋落物中养分的归还等因素的影响,凋落物矿化释放的养分主要集中在土壤表层,导致 SOC、TN 和 TP 出现表层聚集现象<sup>[49]</sup>。此外,有机质的输入还受到土壤渗透性、微生物分解活性和根系吸收的限制<sup>[55]</sup>,研究区表层土壤容重较小,土壤孔隙度大(表 2),通气性较好,土壤微生物对枯落物的分解作用较强<sup>[12]</sup>,导致表层土壤中养分的富集<sup>[56]</sup>,而随着土壤深度的增加,植物根系减少,根生物量降低<sup>[41]</sup>,而根分泌物和土壤微生物是深层土壤营养的主要来源<sup>[37]</sup>。研究结果表明,土壤容重和孔隙度也是影响碳氮磷含量和储量的重要指标<sup>[22]</sup>(表 5)。相对于 SOC 和 TN 储量而言,土壤深度对 TP 储量影响不显著(表 3),这与张雨鉴等<sup>[7]</sup>对滇中磨盘山的研究结果一致,因为磷主要来源于岩石的风化,受母质影响较大,TP 变异性较低(变异系数 0.11),而碳氮除了受土壤母质的影响外,主要与植被类型和气候条件有关<sup>[2]</sup>。

4 种植被土壤 C/P 和 N/P 比值表层(0—20 cm)均大于底土(40—60 cm),因为表层枯落物将更多养分释放到表层土中<sup>[39]</sup>,随着土层的加深,不同植被 C/N 变化趋势不一致,可能与 SOC 的含量和土壤 pH 值有关(表 5),次生常绿阔叶林 0—20 cm 层 C/N 与针阔混交林和荒坡灌草丛间的差异不显著,与艾瑞等<sup>[36]</sup>的研究结果一致,表明处于正向演替顶端的植被群落不一定会降低土壤的 C/N 比值<sup>[36]</sup>。而 C/P 随着土壤深度增加而降低,与每层土壤中所含腐殖质的量有关<sup>[49]</sup>。在 20 cm 以下土壤中,次生常绿阔叶林的 C/P、C/N 和 N/P 比值整体大于其他植被类型,是因为不同植被类型下的土壤动物生物量不同,有研究表明,阔叶林下土壤中的蚯蚓生物量显著高于针叶林<sup>[43]</sup>,蚯蚓的活动能够增加土壤空隙,可能将更多的凋落物从土壤表层带入底层,进而增加阔叶林底层的土壤的 SOC 的含量。在本研究中,植被类型、土壤深度和它们的相互作用显著地影响了 SOC、TN 和 TP 浓度和储量(表 3),表明植被类型和土壤深度是影响土壤养分分布的重要因素。

从上述分析可以看出,在该区域,即使是修复达到当地目前最好的植被——次生常绿阔叶林,其土壤碳氮磷储量相对较低,土壤的生态化学计量特征劣于其他类似地区<sup>[39]</sup>,这种情况与滇中地区毗邻金沙江干热河谷有关。这里降雨量少而集中,温度高而蒸发量大,先天属于生态脆弱区,生态修复难度大<sup>[23,27]</sup>。加大该区域的研究力度,提高长江上游脆弱生态区的生态修复科技支撑水平,尽快提升区域生态健康水平,对构建长江上游生态安全屏障具有重要意义。

## 4 结论

(1) 植被恢复能够显著增加退化山地土壤碳氮磷储量,随着恢复演替的进行,土壤 SOC、TN 储量逐渐增大,TP 储量逐渐降低。次生常绿阔叶林 SOC 储量最高,达 123.41 t/hm<sup>2</sup>,TN 储量在针阔混交林最高(4.91 t/hm<sup>2</sup>),TP 储量云南松林(2.57 t/hm<sup>2</sup>)显著( $P < 0.05$ )高于其他植被类型,次生常绿阔叶林最低(2.2 t/hm<sup>2</sup>)。

(2) 碳氮磷储量在 0—60 cm 土层上整体随土壤深度加深呈现降低的趋势,植被类型和土壤深度及其交

互作用显著影响土壤碳氮磷储量和化学计量比,此外,土壤容重和孔隙度也是影响碳氮磷含量和储量的重要指标。

(3)研究区 C/N 较高,有利于有机物的积累,C/P 和 N/P 较低,植被恢复受到氮含量限制。次生常绿阔叶林下土壤的 C/N、N/P 和 C/P 比值高于其他植被类型,对土壤理化性质的恢复效果最好。植被恢复改善了土壤养分状况,造林是退化土壤恢复的有效途径。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Sistla S A, Schimel J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change. *New Phytologist*, 2012, 196(1): 68-78.
- [ 2 ] 吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 关晋宏, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(10): 3385-3393.
- [ 3 ] Fujita Y, Van Bodegom P M, Witte J P M. Relationships between nutrient-related plant traits and combinations of soil N and P fertility measures. *PLoS One*, 2013, 8(12): e83735.
- [ 4 ] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [ 5 ] Ågren G I, Wetterstedt J Å M, Billberger M F K. Nutrient limitation on terrestrial plant growth-modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. *New phytologist*, 2012, 194(4): 953-960.
- [ 6 ] 张芸, 李惠通, 张辉, 黄彬彬, 刘春华, 蒋宗垠, 马祥庆. 不同林龄杉木人工林土壤 C:N:P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2019, 39(7): 2520-2531.
- [ 7 ] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 李加文. 滇中亚高山 5 种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 73-82.
- [ 8 ] Yue K, Fornara D A, Yang W, Peng Y, Li Z, Wu F, Peng C. Effects of three global change drivers on terrestrial C:N:P stoichiometry: a global synthesis. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2450-2463.
- [ 9 ] Yu Z P, Wang M H, Huang Z Q, Lin T C, Vadeboncoeur M A, Searle E B, Chen H Y H. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1308-1320.
- [ 10 ] Rudel T K, Coomes O T, Moran E, Achard F, Angelsen A, Xu J C, Lambin E. Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 23-31.
- [ 11 ] Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, Mollicone D, Rezende M, Routh D, Zohner C M, Crowther T W. The global tree restoration potential. *Science*, 2019, 365(6448): 76-79.
- [ 12 ] 张光德, 赵传燕, 戎战磊, 毛亚花. 祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(4): 533-540.
- [ 13 ] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2019, 39(21): 7996-8002.
- [ 14 ] Chen L Y, Li P, Yang Y H. Dynamic patterns of nitrogen: phosphorus ratios in forest soils of China under changing environment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(9): 2410-2421.
- [ 15 ] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [ 16 ] Gao Y, He N P, Yu G R, Chen W L, Wang Q F. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: a case study in China. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 171-181.
- [ 17 ] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [ 18 ] Xiao H B, Li Z W, Dong Y T, Chang X F, Deng L, Huang J Q, Nie X D, Liu C, Liu L, Wang D Y, Liu Q M, Zhang Y R. Changes in microbial communities and respiration following the revegetation of eroded soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 246: 30-37.
- [ 19 ] 杨帆, 潘成忠, 鞠洪秀. 晋西黄土丘陵区不同土地利用类型对土壤碳氮储量的影响. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 318-324.
- [ 20 ] 徐芷君, 刘苑秋, 方向民, 陈伏生, 刘晓君, 刘鹏溟, 袁新月, 吴高洋. 亚热带 2 种针叶林土壤碳氮磷储量及化学计量比对混交响应. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 165-170.
- [ 21 ] Yang W J, Cheng H G, Hao F H, Ouyang W, Liu S Q, Lin C Y. The influence of land-use change on the forms of phosphorus in soil profiles from the Sanjiang Plain of China. *Geoderma*, 2012, 189: 207-214.
- [ 22 ] 叶春, 蒲玉琳, 张世熔, 王贵胤, 王奥博, 王丹, 贾永霞, 徐小逊. 湿地退化条件下土壤碳氮磷储量与生态化学计量变化特征. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 181-187, 192-192.
- [ 23 ] Fu D G, Duan C Q, Hou X L, Xia T Y, Gao K. Patterns and relationships of plant traits, community structural attributes, and eco-hydrological functions during a subtropical secondary succession in central Yunnan (southwest China). *Archives of Biological Sciences*, 2009, 61(4): 741-749.
- [ 24 ] 李博. 滇中飒马场小流域不同覆被条件下面源污染状况与径流的水质特征[D]. 昆明: 云南大学, 2011.
- [ 25 ] 杨茂云. 土地利用变化对小流域生态系统服务功能的影响评估——以飒马场和普者黑为例[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [ 26 ] 许鑫. 滇中飒马场小流域不同土地利用条件下群落结构与面源污染输出特征研究[D]. 昆明: 云南大学, 2015.

- [27] 侯秀丽. 滇中植被恢复过程中群落结构与水文功能、土壤肥力耦合研究[D]. 昆明: 云南大学, 2009.
- [28] 国家林业局. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 2000: 334-334.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [31] Al-Kaisi M M, Yin X H, Licht M A. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(4): 635-647.
- [32] 李跃林, 胡成志, 张云, 文锦柱. 几种人工林土壤碳储量研究. *福建林业科技*, 2004, 31(4): 4-7.
- [33] 王瑞璋, 黎建强, 杨关吕, 左嫚, 杨云丽. 磨盘山典型森林生态系统土壤营养元素储量及其价值量评估. *西部林业科学*, 2019, 48(6): 93-99.
- [34] 李义玲, 李太魁, 顾令爽, 杨小林. 紫色土丘陵区小流域不同土地利用方式土壤氮磷储量特征. *安徽农业科学*, 2018, 46(31): 133-137.
- [35] 李智超, 张勇强, 宋立国, 厚凌宇, 孙启武. 江西大岗山不同林龄杉木人工林土壤碳氮储量. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(10): 116-122.
- [36] 艾锐, 张国盛, 李中杰, 和树庄. 滇中不同植物群落对紫色土表层土壤碳、氮累积的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 123-128, 153-153.
- [37] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, Dahlberg A, Ekblad A, Wallander H, Stenlid J, Finlay R D, Wardle D A, Lindahl B D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science*, 2013, 339(6127): 1615-1618.
- [38] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862.
- [39] Ouyang S, Xiang W H, Gou M M, Lei P F, Chen L, Deng X W, Zhao Z H. Variations in soil carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometry along forest succession in southern China. *Biogeosciences*, 2017, doi: 10.5194/bg-2017-408.
- [40] Deng L, Wang K B, Chen M L, Shangguan Z P, Sweeney S. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2013, 110: 1-7.
- [41] 成祥. 滇中不同土壤磷素条件下植物群落磷素营养策略与输出特征[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [42] Carrino-Kyker S R, Kluber L A, Petersen S M, Coyle K P, Hewins C R, DeForest J L, Smemo K A, Burke D J. Mycorrhizal fungal communities respond to experimental elevation of soil pH and P availability in temperate hardwood forests. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, 92(3): fiw024.
- [43] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [44] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲, 赵学勇, 张铜会, 王进. 内蒙古东部两大沙地土壤理化特性沙漠化演变规律的比较. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 779-786.
- [45] 张国盛, 李中杰, 艾锐, 金玲慧. 滇中本地和外来植物群落对紫色土理化性质的影响. *土壤通报*, 2011, 42(4): 852-858.
- [46] An H, Li G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 341-349.
- [47] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.
- [48] 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.
- [49] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [50] 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 沈振西, 张宪洲, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征. *草业学报*, 2014, 23(2): 9-19.
- [51] Zhao F Z, Sun J, Ren C J, Kang D, Deng J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Land use change influences soil C, N, and P stoichiometry under 'Grain-to-Green Program' in China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10195.
- [52] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 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): 675-687.
- [53] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 安韶山. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [54] 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.
- [55] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 雷斯越, 张晓萍. 不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系. *生态学报*, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [56] 董云中, 王永亮, 张建杰, 张强, 杨治平. 晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 955-960.