

三峡库区坡耕地典型香榧套种模式土壤 碳氮磷及其生态化学计量特征

陈胜伦¹, 李天阳¹, 何丙辉¹, 刘玉民¹, 刘亚敏¹, 唐荣栋², 唐林³

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400716;2.云阳县森林资源监测中心,
重庆 404599;3.云阳县中苗林业有限责任公司,重庆 404599)

摘要:为阐明三峡库区坡耕地典型香榧套种模式对土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其生态化学计量特征的影响,在重庆市云阳县宝坪镇香榧种植基地内,选取香榧纯林(TG)、香榧—黄精(TGP)、香榧—大豆(TGG)3种套种模式为研究对象,分析不同模式及土层深度下土壤C、N、P含量及其生态化学计量特征。结果表明:不同模式的土壤C含量无显著差异,N、P含量均表现为TGG(0.80,0.53 g/kg)>TGP(0.71,0.40 g/kg)>TG(0.56,0.39 g/kg),且与TG相比,TGG的N、P含量分别显著提高42.9%,35.9%。土壤C、N主要富集在0—10 cm土层,而P主要集中在10—20 cm土层。3种模式的土壤C:N、C:P、N:P分别为8.39~10.73,31.63~45.22,3.25~5.61,均低于全国平均值(14.4,136.0,9.3)。N:P<10,表明N为研究区限制性养分。相关性分析结果表明,土壤pH、容重和总孔隙度也是影响土壤C、N、P含量及其生态化学计量的重要指标。香榧套种模式有利于土壤养分的积累,TGG的C、N、P含量高于TGP和TG,有较好的培肥效果。

关键词:土壤养分;农林复合系统;土壤深度;三元相图

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-00220-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.01.029

Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometric Characteristics of Typical *Torreya grandis* Intercropping Systems on Sloping Farmland in the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Shenglun¹, LI Tianyang¹, HE Binghui¹, LIU Yumin¹,

LIU Yamin¹, TANG Rongdong², TANG Lin³

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716;

2.Yunyang County Forest Resources Monitoring Center, Chongqing 404599;

3.Yunyang County Zhongmiao Forestry Co., Ltd., Chongqing 404599)

Abstract: To explore the effects of typical *Torreya grandis* intercropping systems on soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) content and their stoichiometric characteristics on sloping farmland in the Three Gorges Reservoir Area, three typical intercropping systems, *T. grandis* (TG), *T. grandis*-*Polygonatum sibiricum* (TGP), and *T. grandis*-*Glycine max* (TGG), were selected in the *T. grandis* planting bases located in Baoping Town, Yunyang County, Chongqing. The contents of C, N, P in soil and their ecological stoichiometric characteristics under different models and soil depths were analyzed. The results showed that there was no significant difference in soil C content among different systems. Both N and P contents followed the order of TGG (0.80, 0.53 g/kg)>TGP (0.71, 0.40 g/kg)>TG (0.56, 0.39 g/kg), and compared with TG, N and P contents of TGG were significantly higher by 42.9% and 35.9%, respectively. Soil C and N mainly concentrated in the 0—10 cm soil layer, while P mainly concentrated in the 10—20 cm soil layer. Soil C:N, C:P and N:P under the three systems was 8.39~10.73, 31.63~45.22 and 3.25~5.61, respectively, which were all lower than the national average values (14.4, 136.0, 9.3). And the N:P

收稿日期:2022-07-07

资助项目:重庆市科技兴林项目(2019-12);国家自然科学基金项目(U21A20187);中央高校基本科研业务费项目(SWU-KT22060)

第一作者:陈胜伦(1997—),男,硕士研究生,主要从事资源利用与植物保护研究。E-mail:cs1543474624@163.com

通信作者:何丙辉(1966—),男,博士,教授,博导,主要从事土壤侵蚀与水土保持、森林培育与林业生态工程研究。E-mail:hebinghui@swu.edu.cn

ratio was less than 10, indicating that N was the limiting nutrient in the study area. The results of the correlation analysis showed that soil pH, bulk density and total porosity were also important indicators affecting soil C, N, and P contents and their ecological stoichiometry. *T. grandis* intercropping systems significantly enhanced the accumulation of soil nutrients. The content of C, N and P of TGG was higher than that of TGP and TG, and TGG showed better fertilizer cultivation effect.

Keywords: soil nutrient; agroforestry systems; soil depth; ternary diagram

生态化学计量学已经成为当前生态学研究中的一个热点和焦点^[1],为研究不同生态系统间的相互作用和碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素之间的平衡及耦合关系提供新方法^[2]。土壤含量是表征土壤养分的重要指标,也是植物生长过程中所需营养元素的重要来源^[3]。而其生态化学计量特征反映养分的动态变化,在研究养分限制特征方面应用广泛,对揭示植物对养分的需求状况具有重要的指示作用^[4]。因此,开展对土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征的研究,不仅对了解土壤肥力、植物对养分需求等状况有重要意义,而且对厘清 C、N、P 在土壤—植物中的循环和平衡机制具有重大意义^[5]。近年来,国内外学者针对陆地生态系统的生态化学计量特征已有大量的研究,涉及到荒漠、草地、灌丛、森林等不同生态系统,从植被类型、植物器官,以及树龄等方面展开研究^[6-9],但是对经济林的生态化学计量特征研究比较少见^[10]。

香榧(*Chinese torreyia*)为红豆杉科(*Axaceae*)榧树属(*Torreya*),是我国特有的珍稀经济树种,主要种植于浙江、安徽、重庆等地。香榧不仅果实具有极高的药用价值,其种植还具有显著的水土保持及增加生物多样性等作用^[11]。因为香榧生长周期长,在种植时往往选择套种其他经济作物,在充分利用土地资源的同时也获得更多的经济效益。三峡库区有大量的坡耕地,占总耕地面积的 60%^[12],但坡耕地存在着严重的水土流失,导致库区坡耕地土地生产力严重下降。近年来,香榧套种模式被广泛应用于库区坡耕地,以期达到控制水土流失,提高土壤肥力的目的。已有的研究^[13]较多关注香榧套种对植物生长的影响,但其对土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征变化的影响等研究还很少见,相关作用机制还不清楚。因此,本研究选择三峡库区坡耕地 3 种典型的香榧套种模式,香榧纯林 [*Torreya grandis* (TG)],香榧—黄精 [*Torreya grandis-Polygonatum sibiricum* (TGP)],香榧—大豆 [*Torreya grandis-Glycine max* (TGG)]为研究对象,分析各模式下不同土层深度土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征,为三峡库区的香榧经营模式以及土壤养分管理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市云阳县宝坪镇香榧种植基地(30°50′18″—30°56′15″N,108°48′31″—108°56′27″E),海拔高度为 540~640 m,为亚热带季风气候区。年平均气温 16.2 °C,年均无霜日 295 天,年均降水量 1 200 mm,主要集中在 5—10 月。>10 °C 积温 5 990 °C,年日照时间 1 484.8 h。研究区土壤类型为黄壤,其母质均为侏罗系新田沟组黄色泥岩、砂岩风化残坡积物,植被为亚热带常绿针叶林带,主要分布有马尾松、杉木以及水青冈等。研究区经济林以种植香榧(红豆杉科植物)为主,并套种黄精(百合科植物)、大豆(豆科植物)等经济作物。香榧种植于 2016 年春季,植间距 2 m×2 m,在春季香榧林萌芽之前和秋后距香榧植株基部 50 cm 处开环状沟进行施肥和覆土,施用肥料为生物有机肥(有机质(以干基计)≥45.0%),有效活菌数(cfu)≥2.0 亿/g,N+P₂O₅+K₂O≥5.0%),施肥量为 0.5 kg/株。黄精同样施用生物有机肥,施肥量为 0.25 kg/株。大豆不作施肥处理,收获后秸秆回田。每年 4、11 月对各模式进行定期人工除草。

1.2 土壤样品采集与测定

2021 年 9 月,在立地条件相似的 5 年生香榧林地中选择香榧纯林(TG)、香榧—黄精(TGP)、香榧—大豆(TGG)3 种模式,分别设置 3 块面积为 10 m×10 m 的典型样地(图 1)。

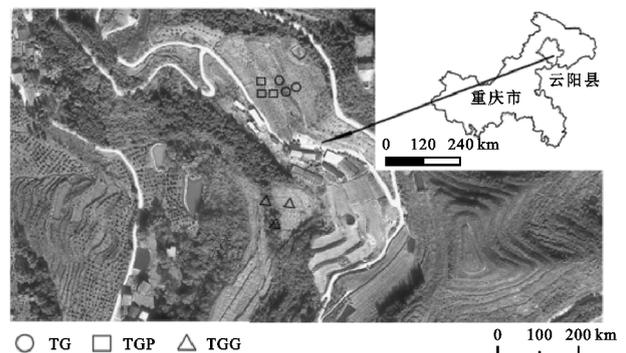


图 1 不同套种模式采样点分布

在每个样地中按照“S”形 5 点法用铝盒及 100 cm³ 环刀采集 0—10, 10—20, 20—30 cm 土层的土样,若采样点正好位于施肥点,则将采样点向远离香榧方向偏移 10 cm,再进行采样。同时,在各点分土

层采集 1 kg 左右的混合土样,剔除根系、叶片、砾石等杂物后装入编号密封袋,带回实验室。混合土样经自然风干后过 1.025 mm 筛备用。土壤铝盒及环刀样品用来测定土壤容重和孔隙度。不同模式采样点的基本情况见表 1。

表 1 不同套种模式采样点概况

模式	纬度(N)	经度(E)	坡度/(°)	地势	海拔/m	地形	土壤类型
香榧(TG)	30°52'46"	108°54'46"	3	缓坡	580.1	低山	黄壤
香榧—黄精(TGP)	30°53'19"	108°54'44"	4	缓坡	582.6	低山	黄壤
香榧—大豆(TGG)	30°52'36"	108°54'44"	9	缓坡	560.7	低山	黄壤

1.3 数据分析

采用 Excel 2019 软件进行数据处理,采用 IBM SPSS 25.0 软件进行单因素方差、Pearson 相关性及回归分析,显著性水平为 $p < 0.05$ 。采用 AutoCAD 2020 和 Origin Pro 2021 软件进行制图。

Tian 等^[16]研究发现,在 0—10 cm 土层中 C:N:P 有一个限制性良好的比值为 134:9:1。本研究将 3 种模式在 0—10 cm 土层中 C、N 和 P 含量根据这个比值进行 Redfield^[17]归一化处理。首先将 C、N 和 P 含量换算成摩尔含量,再将 N、P 摩尔含量分别乘以 14.89,134,得到 C_R 、 N_R 和 P_R ,最后将转换后的 C_R 、 N_R 和 P_R 作为其 Redfield 总量的相对百分比在三元相图中来说明 C、N 和 P 的限制性关系。根据 Wang 等^[18]对泥炭地中不同植物功能类型下 C、N、P、K 的化学计量特征的研究及 Smith 等^[19]对英国泰晤士河

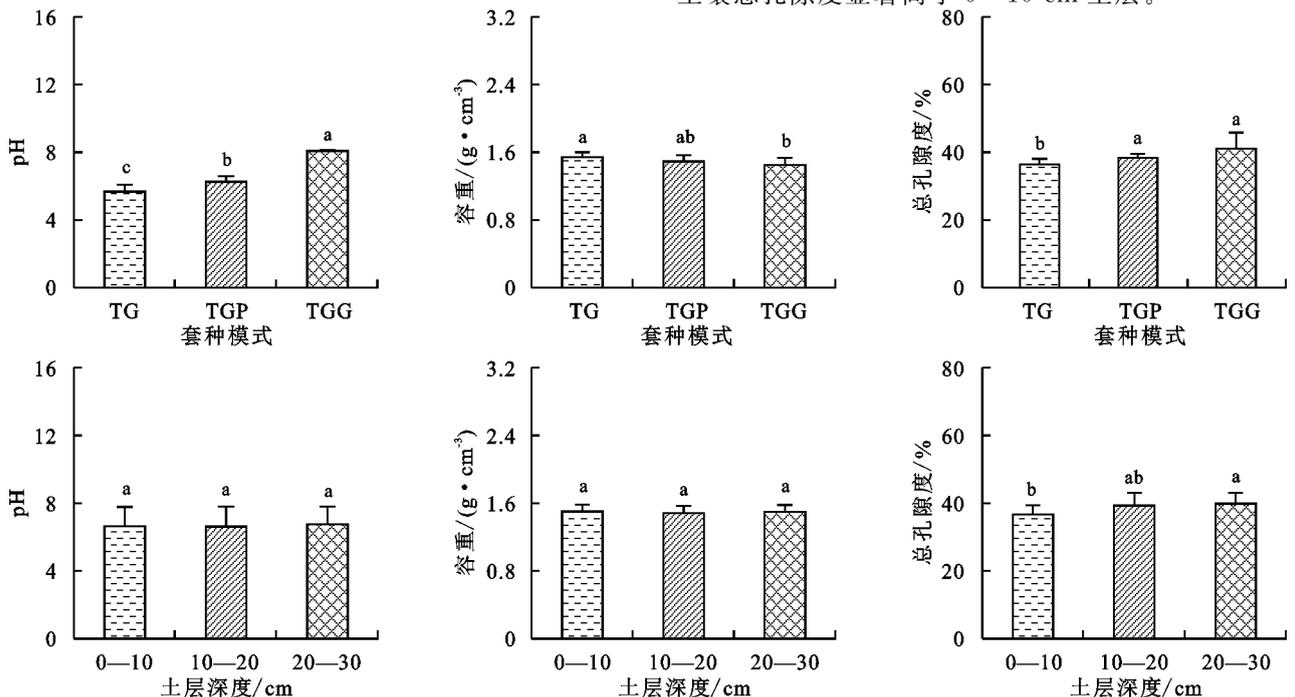
土壤容重和总孔隙度采用环刀法^[14]测定,土壤 pH 采用电位法(土水比为 1:2.5)测定,土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定,土壤全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法^[15]测定。

支流 C、N、P 的化学计量特征的研究,本研究取 30% 为临界值,并绘制 3 条虚线表示临界线,当 C_R 、 N_R 或者 P_R 小于临界值时则代表对应指标处于限制状态。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质及 C、N、P 含量

不同套种模式对土壤 pH、容重和总孔隙度均有显著影响(图 2)。土壤 pH 与总孔隙度均表现为 TGG>TGP>TG,且与 TG 相比,TGP 和 TGG 的 pH 分别显著提高 10.4%,42.3%,总孔隙度分别显著提高 5.2%,13.0%。土壤容重表现为 TG>TGP>TGG,且与 TG 相比,TGG 的容重显著降低 5.8%。不同土层深度对土壤 pH、容重均无显著影响,而对土壤总孔隙度有显著影响(图 2)。土层总孔隙度随着土层深度的增加而逐渐降低,且 20—30 cm 土层的土壤总孔隙度显著高于 0—10 cm 土层。



注:误差棒表示均值的标准差;图柱上方不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同套种模式和土层深度的土壤 pH、容重、总孔隙度

由图 3 可知,不同套种模式对土壤 C 含量无显著影响,但对土壤 N、P 含量均有显著影响。N 含量和 P 含量

均表现为 TGG>TGP>TG,且与 TG 相比,TGG 的 N、P 含量分别显著提高 42.9%,35.9%。不同土层深度对土壤

C、N、P 含量均有显著影响。土壤 C 含量和 N 含量均随着土层深度的增加而逐渐降低,且 0—10 cm 土层的 C 含量

和 N 含量显著高于 20—30 cm 土层。10—20 cm 土层的土壤 P 含量显著高于 0—10、20—30 cm 土层。

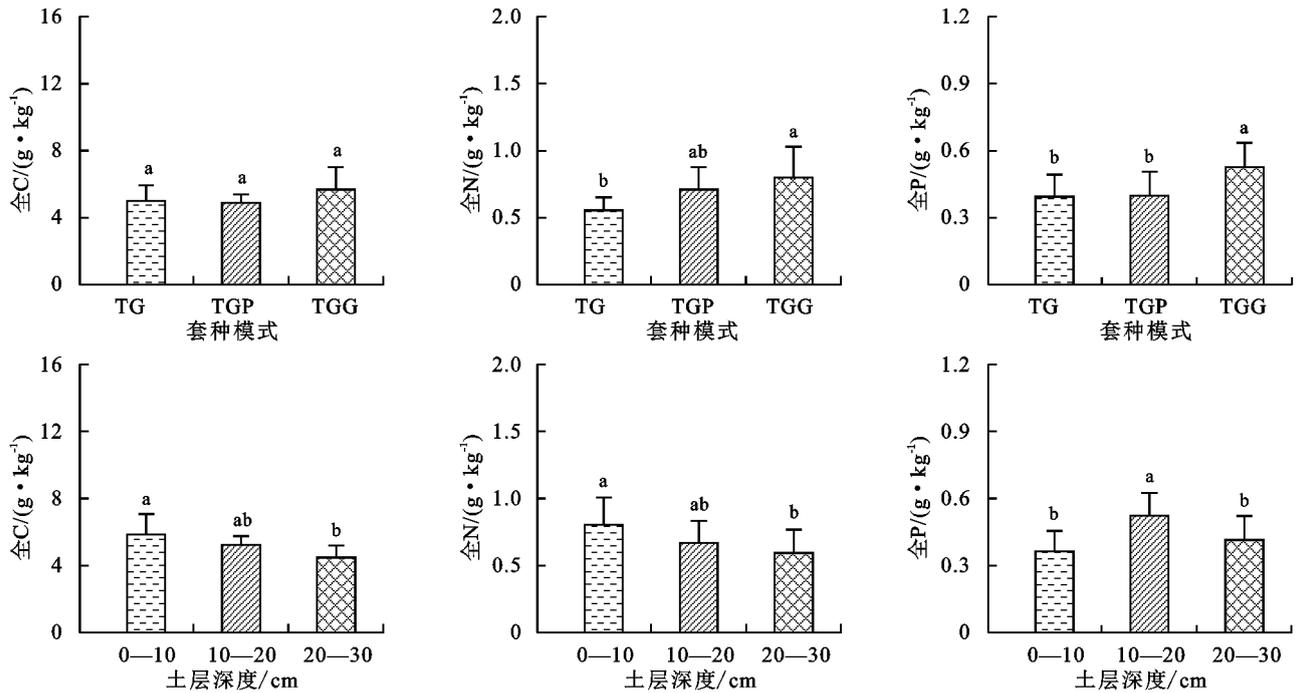


图 3 不同套种模式和土层深度的土壤 C、N、P 含量

2.2 土壤 C、N、P 生态化学计量特征

由图 4 可知,不同套种模式对土壤 C : N、N : P 均有显著影响,但是对 C : P 无显著影响,C : N、C : P、N : P 在不同套种模式中变化的趋势也不尽相同。3 种套种模式土壤 C : N 为 8.39~10.73,且 TG 地 C : N 显著高于 TGP 和 TGG;N : P 在 3.25~5.61,且 TGP 的 N : P 显著高于 TG。不同土层深度对土壤 C : N 无显著影响,但是对土壤 C : P、N : P 有显著影响,且 C : P 与

N : P 在 0—30 cm 土层中有着相同的变化趋势。C : P 与 N : P 均表现为 0—10 cm 土层 > 20—30 cm 土层 > 10—20 cm 土层,且 0—10 cm 土层的 C : P 与 N : P 显著高于 10—20 cm 土层。

在 0—10 cm 土层中,所有的点都集中在三元相图的左下方。3 种模式的 C_R 均低于临界值 30%,N_R 大多也低于临界值 30%,处于临界线以下。总体来看,3 种模式的 C_R、N_R 均比较低,而 P_R 相对较高(图 5)。

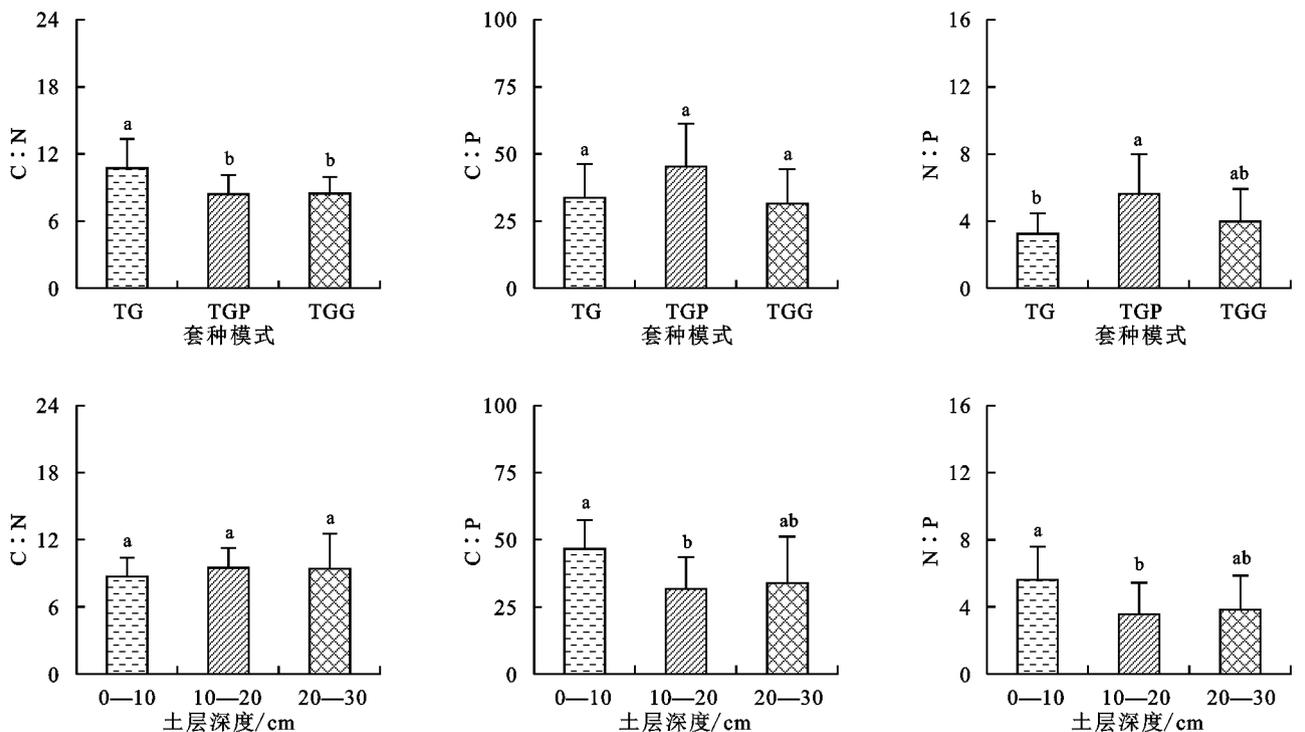


图 4 不同套种模式和土层深度的土壤化学计量比

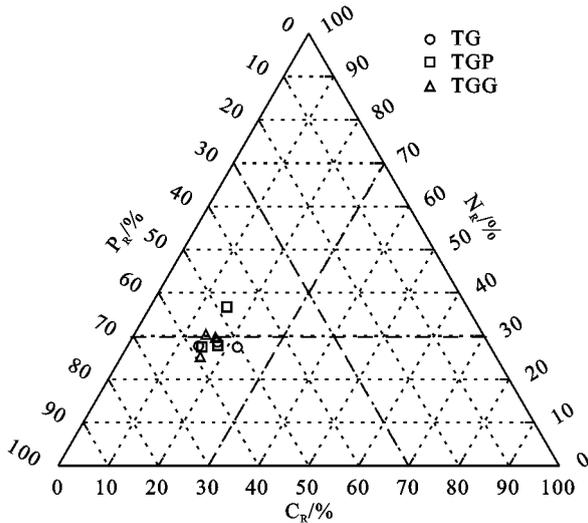


图 5 不同套种模式在 0—10 cm 土层土壤 C、N、P 化学计量的三元图关系

2.3 土壤理化性质与 C、N、P 含量及其生态化学计量比的关系

pH 与土壤总孔隙度呈极显著正相关,与 N、P 呈显著正相关;土壤容重与 N 呈显著负相关,而与 C:N 呈极显著正相关;土壤总孔隙度与 P 呈极显著正相关,而与 C:P 呈极显著负相关。C 与 N 呈极显著线性正相关(图 6);C:N 与 N:P 呈显著线性负相关;C:P 与 N:P 呈极显著线性正相关(表 2)。

3 讨论

从 3 种套种模式的土壤 C、N、P 含量来看,TGG 的土壤综合肥力最高,其次为 TGP,最低的为 TG,说

明套种模式相比于单一种植模式能够提高土壤肥力水平。土壤 C、N 主要来源于地表凋落物、根系分泌物和动植物残体^[20]。土壤 pH 通过影响地表植物物种组成,从而间接影响土壤 C、N 含量^[21]。TGP、TGG 地 C、N 含量高于 TG,这与叶邦宣等^[13]、江丽娟等^[22]研究的结果一致。TGP、TGG 的地表凋落物以及枯死根系经过微生物的分解,促进土壤中 C、N 的积累^[23]。此外,TGG 中大豆秸秆还田有利于增加土壤 C 含量^[24],TGP 中施肥也增强土壤微生物的活性,加速有机物质的分解,导致 TGP 的 C 含量高于 TG,而 TG 较低的 pH 对土壤养分循环和 C 的积存产生消极影响^[25]。TGG 因为大豆和根瘤菌的生物固氮作用,提高土壤中的 N 含量。成土母质、凋落物和施肥水平共同决定土壤 P 含量的变化^[7]。TGG 的 P 含量显著高于 TG,这是因为 TG 的 pH 较低,导致土壤无机磷与铝的结合^[26],降低土壤中的 P 循环,这与 Gao 等^[25]研究结果一致。而 TGG 中大豆秸秆还田后,有利于丰富土壤中的盐基离子,降低土壤中 H⁺ 和 Al³⁺ 含量^[27],从而促进土壤 P 循环。此外,TGG 与 TG 相比,土壤容重更小、孔隙度更高,土壤通气性更好,有利于增强微生物的分解作用,从而提高土壤 P 含量。土壤侵蚀和耕作活动也是影响土壤的 C 和养分含量的重要因素。陈海滨等^[28]发现侵蚀坡地的土壤养分含量由于受到雨水的淋洗作用明显降低;李鉴霖等^[29]研究表明,多年的翻耕活动,使得耕地土壤表层松软,易发生水土流失,从而减少土壤 C、N 含量。

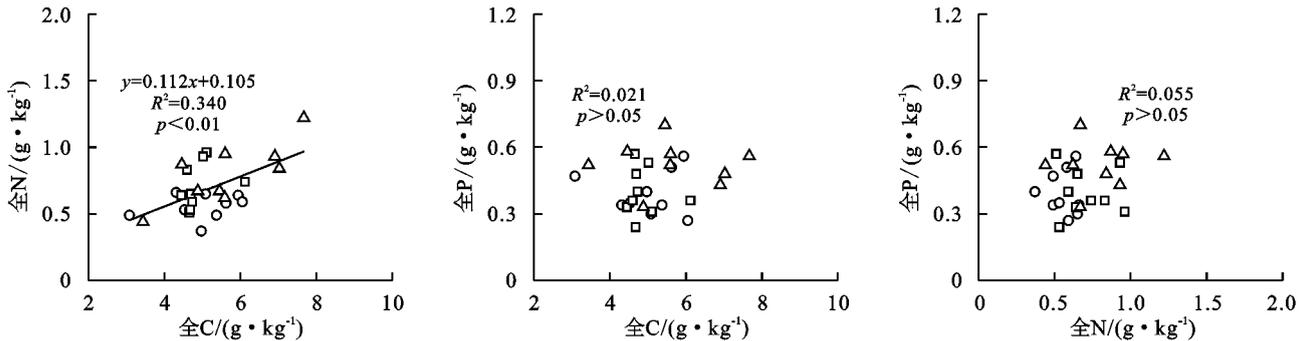


图 6 土壤 C、N、P 含量之间的关系

表 2 土壤理化性质与 C、N、P 含量和化学计量比之间的 Pearson 相关性分析

指标	pH	容重	总孔隙度	全 C	全 N	全 P	C : N	C : P	N : P
pH	1.000	-0.379	0.525**	0.376	0.456*	0.440*	-0.252	-0.139	0.020
容重		1.000	-0.285	-0.064	-0.432*	-0.355	0.513**	0.320	0.029
总孔隙度			1.000	-0.220	0.020	0.492**	-0.200	-0.496**	-0.350
全 C				1.000	0.583**	0.145	0.152	0.436*	0.304
全 N					1.000	0.234	-0.674**	0.088	0.579**
全 P						1.000	-0.153	-0.788**	-0.621**
C : N							1.000	0.256	-0.431*
C : P								1.000	0.726**
N : P									1.000

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。

土壤 C : N 是表征土壤有机质矿化速率的重要指标,并且 C、N 之间成反比关系^[4]。本研究中,不同模式间的土壤 C : N 为 8.39~10.73,低于中国土壤 C : N 的平均值 14.4^[16]。贾国梅等^[30]研究发现,三峡库区柏树地、橘树地和菜地的土壤 C : N (6.45~7.18)同样低于中国土壤 C : N 的平均值,表明研究区土壤的矿化作用较强。3 种模式的 C_R 均小于 30%,处于 C_R 的临界线以下(图 5),说明研究区存在 C 限制。TGP、TGG 地 C : N 显著低于 TG,表明复合套种模式能够显著减少微生物同化量^[3],有利于土壤 N 的积累。随着植被种类的增加,土壤 C 的增加速率小于土壤 N(图 3),使得 TGP、TGG 的 C : N 减小。土壤 C : P 反映土壤 P 的矿化能力,表征 P 的有效性^[23]。研究区中土壤 C : P 为 31.63~45.22,远低于中国土壤 C : P 的平均值 136^[16],有研究^[31]表明,低 C : P 有利于促进微生物对有机质的分解,释放出更多的养分,而高 C : P 导致微生物与植物争夺土壤中的无机 P,不利于植物生长,这表明研究区土壤磷存在净矿化现象,土壤 P 有效性较高。N : P 是判别限制性养分的重要指标之一,同时也是 N 饱和的判断指标^[5]。本研究中,土壤 N : P 为 3.25~5.61,低于中国土壤 N : P 的平均值 9.3^[16]。有研究^[7]表明,当土壤 N : P < 10 时,植被生长受到 N 限制,说明研究区内 3 种模式的植被生长受到土壤 N 限制。此外,在三元相图中(图 5)3 种模式的点都靠近左下角, N_R 大多数低于 30%,这进一步直观地表明研究区植被生长受到土壤 N 限制。TGP、TGG 的 N : P 均高于 TG,这说明套种其他作物能够减少土壤 N 限制。

本研究中土层深度的变化显著影响 C、N 含量,并且随着土层深度的增加而降低,这与前人^[32-33]研究结果一致,因为动植物残体和凋落物首先在土壤表面被微生物分解,从而使养分归还于土壤,因此 C、N 多数富集在土壤表层^[9],而随着土层深度的增加,植物根系和根生物量减少,物质转换速率较低,可提供的养分较少^[20]。土壤 P 含量从 0—10 cm 土层到 10—20 cm 土层显著增加,从 10—20 cm 土层到 20—30 cm 土层显著减小,呈先增大后减小的变化趋势,这与马剑等^[23]发现,甘青锦鸡儿群落和鬼箭锦鸡儿群落的土壤 P 含量在 0—30 cm 土层的变化趋势一致。这可能是因为根系特性以及长度不同,导致养分吸收含量存在差异,从而造成土壤 P 在土壤垂直分布上的差异^[34]。

本研究中不同土层深度间的 C : N 差异不显著,与王维奇等^[35]的研究结果一致,这是因为 C 和 N 呈显著线性正相关(图 6),二者关系紧密,通过相互作

用形成耦合关系,从而对外界条件的变化有着相似的响应^[36]。土层深度的变化显著影响 C : P 和 N : P,这可能与土壤容重和孔隙度有关^[7](图 6)。3 种模式在土壤 0—10 cm 土层的 C : P 和 N : P 均高于 10—20, 20—30 cm 土层,可能是因为凋落物将大部分的养分释放在土壤表面,并且 C、N 增加的速率与 P 不同^[37]。

4 结论

香榧套种模式有利于土壤养分的积累,提高土壤 C、N、P 含量。TGG 的 C、N、P 含量最高,分别为 5.67, 0.80, 0.53 g/kg, 培肥效果最好。C、N 含量在 0—30 cm 土层中随着土层深度的增加而减少,而 P 含量没有此规律。研究区土壤 C : N、C : P 和 N : P 比值均低于全国平均值,且 N : P < 10,研究区内 N 为限制性养分元素。土壤 pH、容重和总孔隙度也是影响 C、N、P 含量及其生态化学计量特征的重要指标。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 贺金生,韩兴国.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.
- [3] 张丽敏,蔡国俊,彭熙,等.喀斯特地区不同果园土壤养分含量及生态化学计量特征[J].南方园艺,2021,32(4):11-15.
- [4] 张增可,吴雅华,黄柳菁,等.海岛森林不同演替阶段土壤和植物的碳、氮、磷化学计量特征[J].西北植物学报,2019,39(5):925-934.
- [5] 曾昭霞,王克林,刘孝利,等.桂西北喀斯特森林植物凋落物—土壤生态化学计量特征[J].植物生态学报,2015,39(7):682-693.
- [6] Bui E N, Henderson B L. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J].Plant and Soil,2013,373(1/2):553-568.
- [7] 何高迅,王越,彭淑娟,等.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[J].生态学报,2020,40(13):4425-4435.
- [8] 孔维苇,袁兴中,卢虹宇,等.三峡库区澎溪河消落带典型草本植物养分及生态化学计量特征[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(5):73-82.
- [9] 雷丽群,卢立华,农友,等.不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].林业科学研究,2017,30(6):954-960.
- [10] 闫道良,黄有军,金水虎,等.山核桃功能器官细根、叶和林地土壤 C、N、P 化学计量时间变异特征[J].水土保持学报,2013,27(5):255-259.
- [11] 王桂芳,索金伟,王哲,等.香榧种实膨大过程中蔗糖代谢及其基因表达[J].浙江农林大学学报,2022,39(1):

- 1-12.
- [12] 袁弘任,魏开涓.三峡库区移民环境容量分析[J].应用生态学报,1997,8(5):557-561.
- [13] 叶邦宣,张深梅,阙利芳,等.不同郁闭度下香榧—多花黄精复合经营生长状况研究[J].浙江林业科技,2021,41(4):45-49.
- [14] 中华人民共和国国家林业局. LY/T 1215—1999 森林土壤水分—物理性质的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:25-49.
- [16] 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(S1/3):139-151.
- [17] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist, 1958, 46(3):205-221.
- [18] Wang M, Moore T R. Carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry in an ombrotrophic peatland reflects plant functional type[J]. Ecosystems, 2014, 17(4):673-684.
- [19] Smith D R, Jarvie H P, Bowes M J. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and eutrophication in River Thames Tributaries, UK[J].Agricultural and Environmental Letters,2017,2(1):1-4.
- [20] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, et al. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest[J]. Science, 2013, 339(6127):1615-1618.
- [21] Wilson S Mc G, Pyatt D G, Malcolm D C, et al. The use of ground vegetation and humus type as indicators of soil nutrient regime for an ecological site classification of British forests[J].Forest Ecology and Management,2001,140(2):101-116.
- [22] 江丽娟,郑怀阳,周伟龙,等.香榧—大豆复合经营对土壤化学性质的影响[J].福建林业科技,2019,46(2):22-24,29.
- [23] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山 5 种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J].西北植物学报,2021,41(8):1391-1400.
- [24] 李欣欣,许锐能,廖红.大豆共生固氮在农业减肥增效中的贡献及应用潜力[J].大豆科学,2016,35(4):531-535.
- [25] Gao Y, He N P, Yu G R, et al. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: A case study in China[J].Ecological Engineering,2014,67:171-181.
- [26] Carrino-Kyker S R, Kluber L A, Petersen S M, et al. Mycorrhizal fungal communities respond to experimental elevation of soil pH and P availability in temperate hardwood forests[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2016, 92(3):e24.
- [27] 黎健龙,涂攀峰,陈娜,等.茶树与大豆间作效应分析[J].中国农业科学,2008,41(7):2040-2047.
- [28] 陈海滨,李想.侵蚀红壤山地微地形条件下的芒萁土壤生态化学计量特征[J].南方农业学报,2020,51(6):1377-1383.
- [29] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊,等.缙云山土地利用方式对土壤有机碳及全氮的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(11):137-145.
- [30] 贾国梅,牛俊涛,何立.三峡库区不同植被对土壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J].湖北农业科学,2016,55(14):3566-3568,3573.
- [31] 王建林,钟志明,王忠红,等.青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J].草业学报,2014,23(2):9-19.
- [32] 刘衡,吕家珑.黄土丘陵区草地生态系统不同植物群落土壤生态化学计量学特征[J].西北农业学报,2016,25(5):779-787.
- [33] Zhao F Z, Kang D, Han X H, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J].Ecological Engineering,2015,74:415-422.
- [34] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [35] 王维奇,仝川,贾瑞霞,等.不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报,2010,24(3):238-242.
- [36] 邓小军,朱柳霏,宋贤冲,等.猫儿山自然保护区不同林分类型土壤生态化学计量特征[J].土壤通报,2022,53(2):366-373.
- [37] Li C Z, Zhao L H, Sun P S, et al. Deep soil C, N, and P stocks and stoichiometry in response to land use patterns in the loess hilly region of China[J]. PLoS One, 2016, 11(7):e0159075.