

崔志鹏, 王菁华, 陈玉婷, 阚德龙, 任学敏. 伏牛山南麓山茱萸人工林土壤碳氮磷及化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (4): 908-915
Cui ZP, Wang JH, Chen YT, Kan DL, Ren XM. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus characteristics and stoichiometry of *Cornus officinalis* plantation at the southern foot of the Funiu Mountain [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021, 27 (4): 908-915

伏牛山南麓山茱萸人工林土壤碳氮磷及化学计量特征

崔志鹏¹ 王菁华¹ 陈玉婷¹ 阚德龙¹ 任学敏^{1, 2, 3}✉

¹南阳师范学院农业工程学院 南阳 473061

²河南省南水北调中线水源区生态安全重点实验室 南阳 473061

³南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心 南阳 473061

摘要 分析人工林土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)及其化学计量特征,对于了解森林土壤养分丰缺和养分平衡从而制定科学合理的经营管理策略具有重要意义.以伏牛山南麓西峡县2个林龄(26年和38年)各自4种林分密度(725、900、1 031、1 250株/hm²)的山茱萸(*Cornus officinalis*)人工林为研究对象,测定0-30 cm土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量,计算C:N、C:P和N:P,分析林龄、林分密度对土壤SOC、TN、TP含量及其化学计量特征的影响,探索土壤SOC、TN、TP含量及其化学计量比相互间的关系.结果表明,山茱萸人工林整体土壤SOC和TN含量丰富,TP含量匮乏;C:P和N:P较高,元素比例严重失衡,P有效性低.林龄38年的土壤SOC、TN、TP含量及C:N、C:P、N:P均高于林龄26年,除C:N外,其他差异均达显著水平($P < 0.05$).林分密度对山茱萸人工林土壤SOC、TN、TP含量及其计量比均存在极显著($P < 0.001$)影响,林龄26年和38年的土壤C:P和N:P均以密度1 031株/hm²的最高,表明该密度下土壤的C、P和N、P比例失衡严重.山茱萸人工林整体土壤TN与TP、C:N与C:P的最优关系可用二次函数表示,前者达极显著水平($P < 0.01$),后者不显著($P > 0.05$),其他土壤C、N、P及计量比相互间呈显著或极显著线性关系;从关系强度来看,C:N和N:P主要受TN含量影响,C:P主要受TP含量影响.由此可见,在山茱萸人工林经营管理中,针对土壤P元素的不足应适当补充施加,调节各元素之间的计量比,进一步促进群落发展.(图2表4参40)

关键词 山茱萸;土壤养分;土壤化学计量学;林龄;林分密度

Soil carbon, nitrogen, and phosphorus characteristics and stoichiometry of *Cornus officinalis* plantation at the southern foot of the Funiu Mountain

CUI Zhipeng¹, WANG Jinghua¹, CHEN Yuting¹, KAN Delong¹ & REN Xuemin^{1, 2, 3}✉

¹ College of Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China

² Key Laboratory of Ecological Security for Water Source Region of Mid-line Project of South-to-North Diversion Project of Henan Province, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China

³ Henan Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Mid-line Project of South to North Diversion Project, Nanyang 473061, China

Abstract Analysis of soil C, N, P, and their stoichiometric characteristics in plantations have great significance for understanding the nutrient abundance, deficiency, and balance of forest soils in order to formulate scientific and rational management strategies. *Cornus officinalis* plantations with four stand densities (725, 900, 1 031, and 1 250 plants/hm²) of two forest ages (26 and 38 years) in Xixia County, the southern foot of the Funiu Mountain were selected as the research sites; the levels of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in the 0–30 cm soil layer were determined, and C:N, C:P, and N:P were calculated. The effects of forest age and stand density on soil SOC, TN, and TP levels and their stoichiometric characteristics were analyzed, and the relationships among soil SOC, TN, and TP levels and C:N, C:P, and N:P were explored. The results showed an overall abundance of soil SOC and TN levels in the *C. officinalis* plantation, whereas the TP content was scarce, and the C:P and N:P ratios were high, indicating a severe imbalance in the element ratio and low availability of P. The soil SOC, TN, and TP, and C:N, C:P, and N:P of the 38-year-old forest were higher than those of the 26-year-old forest; the differences were significant ($P < 0.05$) except for C:N. The stand density had an extremely significant ($P < 0.001$) effect on the soil SOC, TN, and TP levels, and their stoichiometric ratios. The ratios of C:P and N:P were the highest in the *C. officinalis* plantation with a density of 1031 plants/hm² in both forest ages, which revealed that a serious imbalance existed in the ratio of soil C, P, and N, P at this density. The optimal relationships between TN and TP and C:N and C:P in the entire soil of the *C. officinalis* plantation could be expressed through quadratic functions, and although the former was extremely significant ($P < 0.01$), the latter was not ($P > 0.05$). The soil C, N, and P, and their stoichiometric ratios showed significant or extremely significant linear relationships

收稿日期 Received: 2020-03-30 接受日期 Accepted: 2020-05-06

国家自然科学基金项目(31401307)和河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A210014)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31401307) and the Key Scientific and Technological Research Project of Henan Education Department (14A210014).

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: renxuemin2520@126.com)

with each other. According to the strength of the relationship, C:N and N:P were mainly affected by TN content, whereas C:P was mainly influenced by TP content. Thus, in the management of *C. officinalis* plantations, moderate application of P fertilizer can be used to supplement the deficiency of soil P and to adjust the ratio between the soil elements to further promote the development of the community.

Keywords *Cornus officinalis*; soil nutrient; soil stoichiometry; forest age; stand density

生态化学计量学是研究地表生态过程中多种化学元素含量和平衡关系的一门科学^[1],在植物个体生长发育、群落演替、生态系统稳定性、养分利用效率、限制元素判断、全球碳氮磷生物地球化学循环等领域的研究发挥了极其重要的作用,取得了大量研究成果^[2-6]。土壤作为陆地生态系统的重要组成部分,与生物的生存和发展密切相关,其中的碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素不仅是构成土壤的主要组分,也是植物生长的必需元素,3种元素的含量、动态平衡及其化学计量特征直接影响着土壤肥力和植物的生产力^[7-8]。因此,深入开展土壤C、N、P化学计量特征研究对于揭示养分的可获得性、养分循环及平衡机制具有重要意义^[9-10]。

土壤C、N、P含量及其计量特征受多种因素的驱动^[11]。研究表明,群落类型不同其土壤C、N、P含量及C:N、C:P、N:P表现出明显的差异^[11-14],即便是同一植物群落,林龄的不同也导致其生态化学计量特征的显著变化^[10, 15-18],但也有些研究报道了林龄对土壤C:N、C:P和N:P无显著影响^[19]。此外,温度、降水等气候因素^[7, 20],海拔、坡向、坡位等地形因素^[21-22]以及施肥、采伐等经营管理因素^[23-24]等也能对土壤生态化学计量特征产生明显影响。由此可见土壤生态化学计量特征具有高度的复杂性,因此,在特定地区和植被条件下开展土壤生态化学计量特征研究尤为重要,只有这样,才能更有针对性地、精确地为森林经营过程中养分限制或养分循环提供科学指导。

山茱萸(*Cornus officinalis*)在世界上比较稀少,除朝鲜和日本外,我国的秦岭和天目山是其集中分布区^[25],其中,河南伏牛山南麓西峡县是主产地之一,人工林面积达15 000 hm²,年产量1 800 000 kg,占全国年总产量的50%,是推动当地经济发展的重要产业之一,同时也为当地带来了巨大的生态效益。尽管兼具巨大的经济和生态效益,但目前对于该人工群落的研究仅涉及其生长的地质环境^[26]和生态分布区划^[27],而有关土壤C、N、P含量及其化学计量特征的研究尚未见报道。了解山茱萸人工林土壤C、N、P含量及其化学计量特征对于该林型土壤养分管理具有重要意义。我们选取西峡县2个林龄(26年、38年)下各自4种林分密度(725、900、1 031、1 250株/hm²)的山茱萸人工林为研究对象,分析该群落整体、不同林龄和不同林分密度的土壤有机碳(SOC)、总N(TN)、总P(TP)含量及化学计量特征,探讨土壤C、N、P养分元素在山茱萸人工林土壤生态系统中的平衡与限制状况,为该林型持续经营管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河南伏牛山南麓西峡县(111°01'-111°46'E, 33°05'-33°48'N),海拔750-1 450 m。该区域属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,夏季炎热湿润,冬季寒冷干燥。年均降雨量846.4 mm,主要集中在4-9月,约占全年降雨量的70%。年均温15.1℃,最冷月1月和最热月7月平均气温分别为-1.5℃和31.5℃,极端低温和高温分别为-11.5℃和41.2℃。年均无霜期236.2 d,年均≥10℃活动积温4 841℃,年均日照2 018.5 h。土壤类型为黄棕壤。该区域地形地貌复杂,包括中山、低

山、山间盆地、深切谷地等多种类型^[28]。山茱萸人工林营造前对乔木层和灌木层物种进行了大量清除,当前乔木层山茱萸占绝对主导地位,灌木层物种较少,主要有五味子(*Schisandra chinensis*)以及乔木物种栓皮栎(*Quercus variabilis*)和青榨槭(*Acer davidii*)的幼苗;草本层物种丰富,主要有裂苞铁苋菜(*Acalypha brachystachya*)、两型豆(*Amphicarpaea edgeworthii*)、尼泊尔蓼(*Polygonum nepalense*)、铁苋菜(*Acalypha australis*)和活血丹(*Glechoma longituba*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与样品采集

研究区内山茱萸人工林的营造主要集中于1990-1992年和1978-1982年两个时期,林龄分别记作26年和38年,林地较为分散,多呈条带或斑块状。2018年7-9月,通过野外实地调查,选择海拔、土壤类型、坡度、人为干扰较小等立地条件基本相似的两林龄林地,分别于每林龄内选取4种不同现存林分密度A(725株/hm²)、B(900株/hm²)、C(1 031株/hm²)和D(1 250株/hm²)的山茱萸人工林。采用典型样地调查法,分别在每林龄每种密度山茱萸人工林内设置20 m×20 m的样地4块,记录每块样地的海拔、坡度、植物名以及乔木株高和基径,估计林分郁闭度。不同林龄不同密度林分基本情况见表1。

在每块20 m×20 m样地沿对角线分别挖取3个(样地中心和对角)30 cm的土壤剖面,收集0-30 cm土层的土壤样品,装入密封袋带回实验室进行土壤化学指标测定。每样地3个样点的土壤样品作为3个重复分别进行测定。

2.2 测定项目及方法

土壤样品风干过100目筛后进行SOC、TN和TP含量测定, SOC含量用重铬酸钾容量法—外加热法测定, TN含量用凯氏定氮法测定, TP含量用酸溶(H₂SO₄-HClO₄)—钼锑抗比色法测定。

2.3 数据处理

单因素方差分析(one-way ANOVA)用于分析不同林分密度土壤SOC、TN、TP含量及C:N、C:P、N:P之间的差异,新复极差法(Duncan's method)进行多重比较;双因素方差分析(two-way ANOVA)用于分析林龄与密度的交互作用对土壤养分含量和化学计量特征的影响;多项式回归分析(一次或二次)用于分析土壤SOC、TN、TP含量及C:N、C:P、N:P之间的相互关系。统计分析由IBM SPSS Statistics 24软件完成,图由Origin 2018软件完成。

3 结果与分析

3.1 研究区土壤C、N、P含量及计量比特征

由表2可知,研究区山茱萸人工林土壤SOC、TN和TP平均含量分别为23.622、1.971和0.433 g/kg, 3个养分指标变异系数在47.312%-52.410%之间; C:N、C:P和N:P平均值分别为12.311、58.216和4.784, 变异系数分别为13.541%、36.371%和38.378%,参照Wilding根据土壤性质变异系数对其变异程度分类标准(变异系数<15%,小变异;16%-35%,中等变异;

> 36%, 高度变异)^[29], 除C:N变异较小外, 山茱萸人工林土壤SOC、TN和TP含量及C:P、N:P变异均属高度变异, 表明养分分布的不均匀性, 这主要与山茱萸人工林的生产管理、枯落物分解及植物吸收利用密切相关。

3.2 林龄和林分密度对山茱萸人工林土壤SOC、TN、TP含量的影响

从表3可以看出, 林龄、密度和林龄×密度均对山茱萸人工林土壤SOC、TN和TP含量存在显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 影响。林龄38年的土壤SOC、TN和TP平均含量均高于林龄26年, 分别高42.749%、43.474%和26.162%, 表明林龄的增加促进了土壤养分的积累。但两林龄下林分密度对土壤SOC、TN和TP的影响不同, 林龄26年均以密度A的土壤SOC和TN含量最高, 其次为密度C, 密度D和B依次降低, 其中密度A与密度B和D之间差异显著 ($P < 0.05$); 密度A的土壤TP含量显著高于其他3个密度, 密度D、B和C相互间差异不显著 ($P > 0.05$), 但依次降低。林龄38年均以密度B的土壤SOC、TN和TP含量最高, 其次为密度A, 但SOC和TN含量以密度D最低, 而TP含量以密度C最低, 其中密度B土壤SOC和

TN含量与密度C和D、密度B土壤TP含量与其他3个密度差异均达显著水平。

3.3 林龄和林分密度对山茱萸人工林土壤C、N、P化学计量特征的影响

从表4可以看出, 林龄38年的山茱萸人工林土壤C:N、C:P、N:P平均值均高于林龄26年, 分别高0.177%、15.718%和17.824%, 其中C:P和N:P的差异达显著 ($P < 0.05$) 水平; 林分密度对土壤C:N、C:P、N:P的影响均极显著 ($P < 0.01$); 林龄×密度对C:N影响极显著, 而对C:P和N:P的影响不显著 ($P > 0.05$)。从两林龄林分密度对土壤化学计量特征的影响来看, 林龄26年与38年的林分密度对土壤C:N比的影响不同, 前者表现为密度C>密度D>密度B>密度A, 其中密度C与密度A和B之间差异显著, 而后者表现为密度D>密度B>密度A>密度C, 密度D与其他3个密度之间差异均达显著水平; 两林龄林分密度对土壤C:P和N:P的影响相似, 均表现为密度C>密度A>密度D>密度B, 其中林龄26年密度C的C:P与其他3个密度差异显著, 而38年密度C与密度B差异显著; 林龄26年和38年密度C的N:P与密度B和D的差异均显著。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of the plots

林龄 Forest age	现存密度 Density (n/hm^2)	海拔 Altitude (H/m)	坡度 Slope (a°)	郁闭度 Canopy density	平均高度 Average height (h/m)	平均基径 Average base diameter (d/cm)	密度等级 Density class
26 a	675-750	1067-1098	17-22	0.55-0.74	4.35-4.98	11.76-17.40	A
	875-925	821-951	12-25	0.60-0.92	4.42-4.76	12.01-13.63	B
	1000-1050	833-944	18-24	0.58-0.89	4.47-4.82	12.16-15.96	C
	1225-1275	821-873	15-18	0.50-0.85	3.72-4.78	11.33-17.34	D
38 a	675-750	799-1092	18-22	0.60-0.91	4.03-4.77	19.46-26.00	A
	875-950	823-1014	11-25	0.68-0.93	4.48-4.71	21.55-26.77	B
	1000-1050	882-1100	15-22	0.61-0.90	4.18-4.62	17.76-19.07	C
	1200-1275	918-950	12-23	0.70-0.89	4.47-4.59	17.72-19.67	D

本文试验设计中的4种林分密度分别为每林龄每林分密度4个样地的密度平均值, 即725、900、1 031和 1 250株/ hm^2 。

The four stand densities in the experimental design in the study are the average values of the density of four sample plots per forest age, i.e. 725, 900, 1 031 and 1 250 plants/ hm^2 , respectively.

表2 研究区土壤SOC、TN、TP含量及计量比特征统计

Table 2 Statistics of soil SOC, TN, TP contents and their stoichiometric ratios in the study area

统计项 Item	SOC/ $g\ kg^{-1}$	TN/ $g\ kg^{-1}$	TP/ $g\ kg^{-1}$	C:N	C:P	N:P
最小值 Minimum	7.333	0.575	0.115	9.101	23.959	2.179
最大值 Maximum	52.115	4.524	0.950	18.317	114.379	10.254
平均值 Average	23.622	1.971	0.433	12.311	58.216	4.784
标准差 Standard deviation	11.176	1.033	0.207	1.667	21.174	1.836
CV/%	47.312	52.410	47.806	13.541	36.371	38.378

SOC: 有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷。

SOC: Soil organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus.

表3 林龄和林分密度对山茱萸人工林土壤养分含量的影响

Table 3 Effects of forest age and stand density on soil nutrient content in *Cornus officinalis* plantation

林龄 Forest age	林分密度 Stand density	SOC/ $g\ kg^{-1}$	TN/ $g\ kg^{-1}$	TP/ $g\ kg^{-1}$
26 a	A	27.967 ± 3.672b	2.463 ± 0.441ab	0.589 ± 0.195b
	B	12.621 ± 2.485d	1.067 ± 0.152c	0.320 ± 0.073c
	C	22.123 ± 13.522bc	1.737 ± 1.256bc	0.275 ± 0.125c
	D	15.135 ± 1.570cd	1.211 ± 0.124c	0.348 ± 0.088c
38 a	A	28.799 ± 9.198ab	2.478 ± 0.905ab	0.522 ± 0.271b
	B	35.845 ± 10.702a	3.053 ± 1.015a	0.727 ± 0.123a
	C	23.534 ± 13.791b	2.034 ± 1.258b	0.306 ± 0.099c
	D	22.947 ± 7.615b	1.729 ± 0.702bc	0.379 ± 0.070c
变异来源 Source of variation	林龄 Age	15.469***	12.507**	5.928*
	密度 Density	8.345***	7.609***	14.782***
	林龄×密度 Age × density	8.126***	6.471**	12.433***

表中数据为平均值±标准差。同列不同小写字母代表土壤养分含量在0.05水平差异显著。SOC: 有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷。*、**和***分别表示在0.05、0.01和0.001水平差异显著。

The data in the table are mean value ± standard deviation. Different small letters in the same column represent significant difference of soil nutrient content at the 0.05 level. SOC: Soil organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus. *, **, and *** show significant differences at the levels of 0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

表4 林龄和林分密度对山茱萸人工林土壤化学计量比的影响
Table 4 Effects of forest age and stand density on soil stoichiometric ratio in *Cornus officinalis* plantation

林龄 Forest age	林分密度 Stand density	C:N	C:P	N:P
26 a	A	11.459 ± 0.936c	51.110 ± 13.438cde	4.519 ± 1.305bcd
	B	11.785 ± 1.223c	41.272 ± 11.689e	3.491 ± 0.915d
	C	13.446 ± 2.127ab	77.254 ± 18.541a	5.863 ± 1.672ab
	D	12.511 ± 0.520bc	46.260 ± 13.739de	3.696 ± 1.078d
38 a	A	11.773 ± 1.010c	63.927 ± 22.658abc	5.516 ± 2.185abc
	B	11.901 ± 0.808c	49.761 ± 15.273cde	4.208 ± 1.366cd
	C	11.706 ± 2.013c	74.907 ± 26.009ab	6.478 ± 2.348a
	D	13.908 ± 2.209a	61.236 ± 15.877bcd	4.497 ± 1.352bcd
变异来源 Source of variation	林龄 Age	0.004	3.973*	4.526*
	密度 Density	4.402***	6.707***	5.298***
	林龄×密度 Age × density	4.585**	1.130	0.062

表中数据为平均值±标准差。同列不同小写字母代表土壤养分含量在0.05水平差异显著。*、**和***分别表示在0.05、0.01和0.001水平差异显著。
The data in the table are mean value ± standard deviation. Different small letters in the same column represent significant difference of soil nutrient content at the 0.05 level. *, **, and *** show significant differences at the levels of 0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

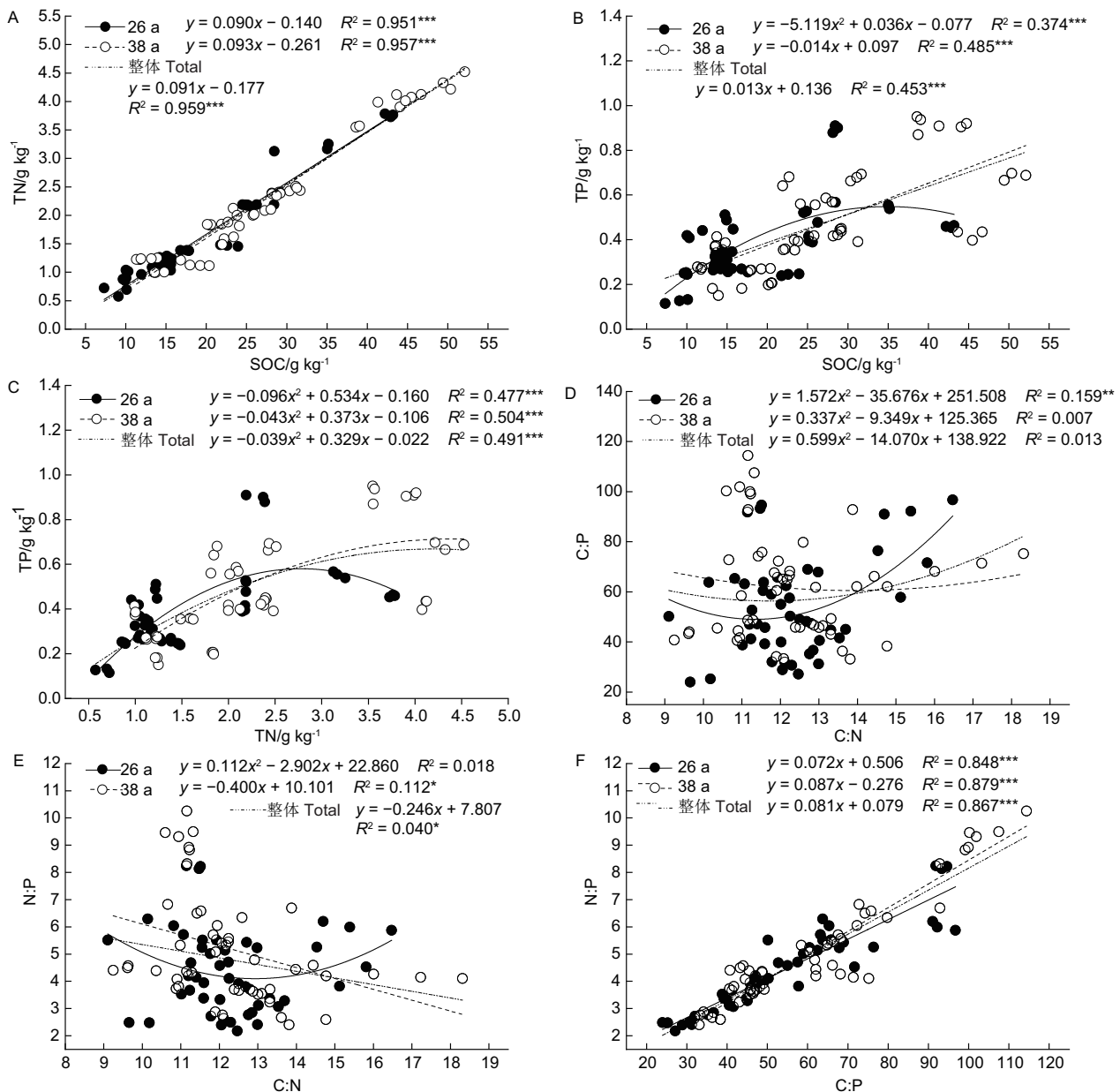


图1 山茱萸人工林土壤化学计量特征之间的关系。图中样点包含每样地的3个重复，32个样地共96个样点。TN：全氮；TP：全磷；SOC：有机碳。*、**和***分别表示在0.05、0.01和0.001水平相关显著。

Fig. 1 The relationships between soil stoichiometric characteristics of *Cornus officinalis* plantation. The sample points in the figure contain 3 repetitions of each plot, and there are 96 samples in 32 plots. TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; SOC: Soil organic carbon. *, **, and *** show significant correlation at the levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

3.4 山茱萸人工林土壤化学计量特征间的关系

无论从整体还是不同林龄来看,山茱萸人工林土壤SOC、TN和TP含量之间均存在密切关系(图1A-C)。整体、26年和38年的土壤TN含量及整体和38年的土壤TP含量均随土壤SOC含量的增加极显著($P < 0.01$)增大,但TP含量的增加较TN慢(图1A和B);林龄26年的土壤SOC含量与TP含量及整体、26年和38年的土壤TN含量与TP含量均存在极显著的二次函数关系(图1B和C)。总体上土壤C:N与C:P无显著($P > 0.05$)关系,但26年的土壤C:N与C:P呈极显著二次函数关系(图1D);整体及38年的土壤N:P随C:N减少显著减小,而林龄26年的土壤N:P与C:N关系不显著(图1E);无论是整体还是26年、38年的土壤N:P均随C:P的增加而极显著增大(图1F)。整体、26年和38年的土壤C:P均随SOC含量的增加而线性递减,但只有整体的达到了显著水平(图2A);无论是总体还是两林龄的土壤C:P和N:P均与SOC含量呈线性递增关系,其中林龄38年时二者关系均不显著,而整体和26年时二者关系均达显著或极显著水平(图2B和C)。整体、26年和38年的土壤C:N均随TN含量的增加显著或极显著下降(图2D),而C:P和N:P均随TN含量的增加而增大,除林龄38年的土壤C:P与TN含量关系不显著外,其他均达显著或极显著水平,且林

龄26年的土壤C:P、N:P随TN含量的增加比总体和38年的更快(图2E和F)。总体上土壤C:N与TP含量存在显著线性递减关系,但林龄26年下二者呈极显著二次函数关系,而林龄38年下二者关系不显著(图2G);整体、26年和38年的土壤C:P均随TP含量增加而显著或极显著线性减小(图2H);土壤N:P总体上随TP含量增加显著线性减小,但林龄38年时二者呈显著二次函数关系,而林龄26年下二者关系不显著(图2I)。由图2还可以看出,不同化学计量比的主要控制元素不尽相同,土壤C:N与TN含量拟合模型的决定系数(0.136)高于SOC含量(0.034),所以土壤TN对C:N的影响更大;土壤C:P和N:P分别主要受TP($R^2 = 0.126$)和TN含量($R^2 = 0.206$)影响。由此可见,山茱萸人工林土壤SOC、TN、TP含量相互间、C:N、C:P和N:P相互间以及SOC、TN和TP与其化学计量比之间关系较为复杂,既有简单的线性关系,也有更为复杂的非线性关系,且这些关系也受到林龄的影响。

4 讨论

4.1 山茱萸人工林土壤SOC、TN、TP含量

土壤C、N、P是反映土壤质量的重要指标,其含量对植物

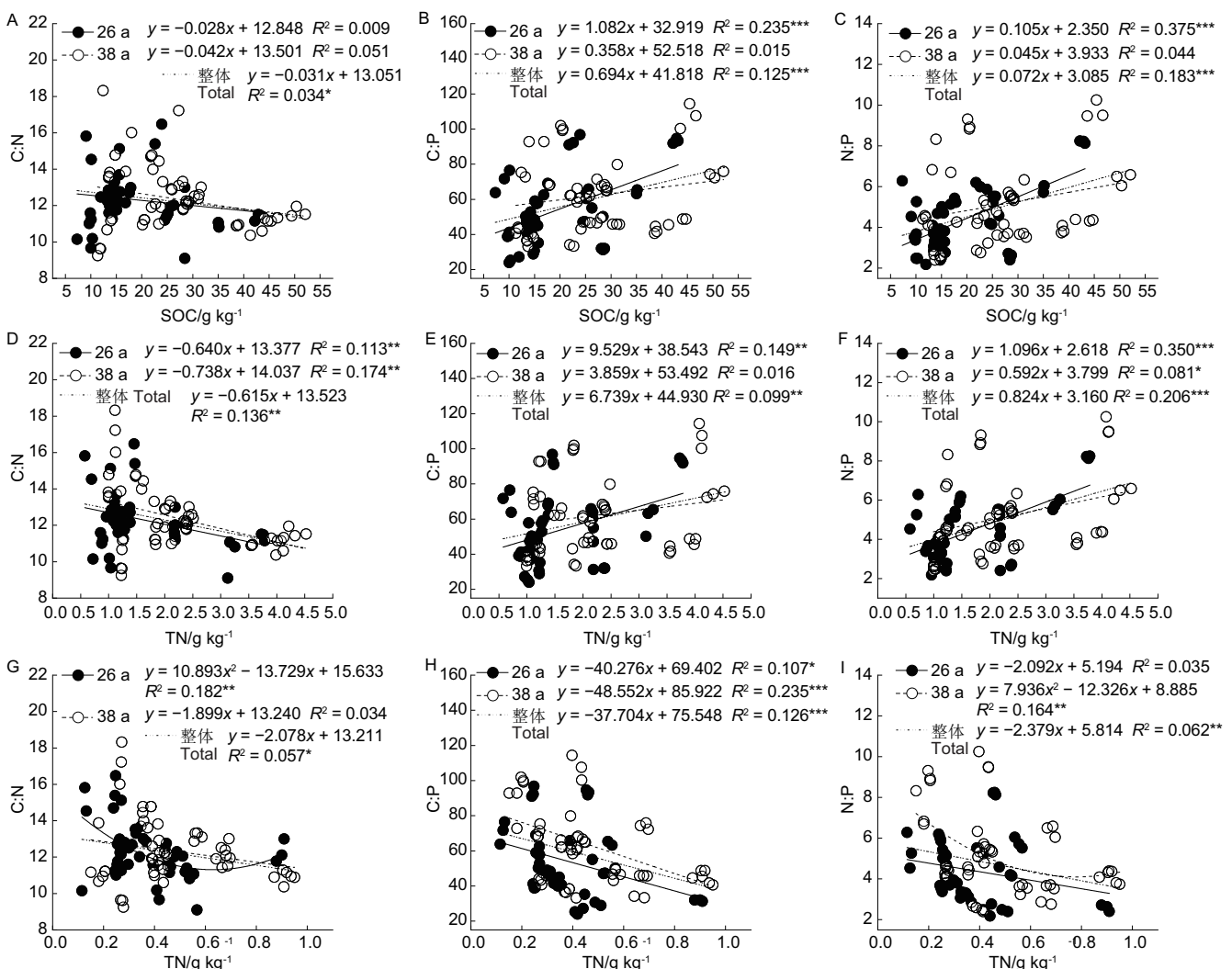


图2 山茱萸人工林土壤化学计量比分别与SOC、TN、TP含量之间的关系。图中样点包含每样地的3个重复,32个样地共96个样点。TN: 全氮; TP: 全磷; SOC: 有机碳。

Fig. 2 The relationships between soil stoichiometric ratio and SOC, TN, TP contents in *Cornus officinalis* plantation. The sample points in the figure contain 3 repetitions of each plot, and there are 96 samples in 32 plots. TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; SOC: Soil organic.

的生长发育具有十分重要的影响^[16]。本研究区山茱萸人工林整体土壤SOC、TN和TP含量分别为23.622、1.971和0.433 g/kg, 其中SOC和TN含量明显高于全国平均水平11.13和1.07 g/kg^[30], 而TP含量明显低于全国平均水平0.65 g/kg^[30], 说明研究区土壤C和N含量丰富, 而P含量较为匮乏。

土壤C、N、P含量与植物群落的发育阶段关系密切。较多研究表明, 土壤SOC和TN含量随林龄的增加呈先下降后减小的变化趋势^[15-16, 31-34], 本研究结果与之存在一定差异, 本研究发现, 高林龄(38年)的山茱萸人工林土壤SOC、TN和TP含量(分别为27.781、2.324、0.383 g/kg)显著高于较低林龄(26年)(分别为19.462、1.620、0.484 g/kg), 产生这种差异的原因可能主要是前人的研究中包含有较小的林龄, 此阶段植物较小, 对土壤中有机质、矿质元素吸收利用较少, 土壤C、N、P含量较高; 当林木生长进入到速生生长阶段后, C、N、P由土壤向植物大量转移, 导致土壤C、N、P含量降低; 当林龄达到高林龄以后, 林木生长变缓, 吸收养分减少, 凋落物及植物根系分解产生的C、N、P大量进入土壤, 土壤C、N、P含量相应增加^[16, 33], 而本研究中只有2个林龄梯度, 且均处于中林龄以后, 故土壤C、N、P含量随林龄的增加而递增, 相似的结果也为任璐璐等^[10]、刘愿等^[35]所报道。

本研究发现, 林分密度对土壤SOC、TN和TP含量存在显著影响, 两林龄下均为较低林分密度(林龄26年和38年的土壤养分最高分别出现于密度A和B)的土壤SOC、TN和TP含量较高, 这是由多方面原因造成的, 其一是较低密度的林分消耗的土壤养分相应较少; 其二是较低密度的林分郁闭较小, 林下光照、温度等环境条件较好, 林下植被尤其是草本层发育良好, 能够把吸收的大量C、N、P快速归还土壤, 利于土壤养分积累。

4.2 山茱萸人工林土壤C、N、P计量比

森林土壤C、N、P计量比是评价土壤肥力、反映土壤内部C、N、P循环和平衡的重要指标^[36]。C:N反映土壤有机质的矿化速率, 其值越高有机质矿化分解速率越慢^[30]。本研究中山茱萸人工林整体土壤C:N为12.311, 略高于中国陆地土壤平均水平(10.459, 质量比)^[37], 表明该研究区域土壤矿化速率略低于平均水平。土壤矿质化是土壤养分转化潜力的体现, 说明山茱萸人工林土壤养分转化潜力有待深入挖掘, 植物与土壤关系尚需进一步协调。C:P反映土壤微生物矿化有机物释放P的能力, 其值越低土壤P有效性越高^[30]。本研究区整体土壤C:P为58.216, 远高于中国陆地土壤平均水平(17.198, 质量比)^[37], 表明研究区土壤有机质矿化释放P的能力较弱, 土壤P有效性较低。N:P反映土壤N、P平衡状况, 其值用作衡量N、P养分元素限制的指标^[33]。本研究区域土壤整体N:P为4.784, 也远高于中国陆地土壤平均水平(1.644, 质量比)^[37], 再结合本研究区较高的土壤N含量, 可以推断出山茱萸人工林土壤N、P元素的严重失衡, P是该区域土壤营养的限制性因素。因此, 在经营管理中应合理施用一定量的P肥来补充土壤P元素不足, 调节元素间的平衡, 进而促进该群落的发展。

在对其他人工林的研究中, 不少研究者发现土壤C:N随林龄增加而呈现增加趋势^[18, 31, 35, 38], 但本研究发现, 林龄26年和38年的山茱萸人工林土壤C:N分别为12.300和12.321, 两者之间无显著差异, 说明土壤C和N这两种结构性成分在不同林龄山茱萸人工林间的积累和消耗过程存在相对固定的比值, 相似结果也为其他学者在对其他人工林的研究中所发现^[17, 39]。本研究结果显示, 林龄26年的山茱萸人工林土壤C:P和N:P均显著($P < 0.05$)低于38年, 表明林龄38年的山茱萸人工林土壤P的有效性更低, N、P元素更为失衡, 在管理中应给予更多的P肥投入。

本研究发现, 林分密度对山茱萸人工林土壤C、N、P计量比存在极显著影响($P < 0.001$), 26年和38年的土壤C:N分别以密度C和密度D最高, 说明与土壤N素积累相比, 较高的林分密度更利于土壤C素积累, 从而导致土壤有机质矿化速率的降低。两林龄山茱萸人工林土壤C:P和N:P均随林分密度的增加呈现出先降低后升高再降低的变化趋势, 其中均以密度C的C:P和N:P最大, 说明该密度下土壤P的有效性最低, N、P元素失衡更为严重, 在管理中尤其要注意P元素的补充。至于出现这种复杂趋势的原因, 可能与不同林分密度植物根系的分布、物种的组成等有关, 尚需进一步研究。

4.3 山茱萸人工林土壤C、N、P含量及计量比关系

研究表明, 土壤中元素之间的关系是十分密切的, 彼此耦合的^[40]。以往的众多研究在探索元素之间关系时多采用简单线性相关, 而没有进行最优拟合, 这在一定程度上不能准确地反映营养元素之间的关系^[40]。本研究采用一次或二次多项式回归法分析土壤SOC、TN、TP含量及其计量比之间的相互关系。通过最优拟合发现, 对于整个山茱萸人工林, TN与TP、C:N与C:P的最优关系可用二次函数拟合, 其中前二者达到极显著($P < 0.001$)水平, 而后二者关系不显著($P > 0.05$); 其他土壤SOC、TN、TP及计量比相互间呈显著或极显著线性关系。本研究还发现, 土壤SOC、TN、TP及计量比相互间的关系也受到林龄的影响, 但均可用线性或二次函数关系表示。此外, 由土壤SOC、TN、TP含量及C:P、C:P和N:P之间的相互关系可知, 研究区整体土壤C:N与TN含量的相关性大于与SOC含量的相关性, N:P与TN含量的相关性大于与TP含量的相关性, 表明研究区整体土壤的C:N和N:P主要受TN含量的影响, 而C:P与TP含量的相关性大于与SOC含量的相关性, 表明C:P主要受TP含量的影响。但对不同林龄的山茱萸人工林来说, 影响土壤C、N、P计量比的元素存在差异, 林龄26年的C:N和N:P主要受TN含量影响, C:P主要受SOC含量影响; 林龄38年的C:N主要受TN含量影响, C:P和N:P主要受TP含量影响。因此, 在经营管理中分林龄进行管理是十分有必要的, 能更准确地制定山茱萸人工林土壤养分平衡策略。

5 结论

(1) 研究区山茱萸人工林整体土壤SOC、TN、TP含量分别为23.622、1.971、0.433 g/kg, C、N含量丰富, P含量匮乏; 土壤C:N、C:P、N:P分别为12.311、58.216、4.784, C:N略高于中国陆地土壤平均水平, C:P和N:P均远高于中国陆地土壤平均水平, 比例严重失衡, P有效性低。

(2) 林龄对山茱萸人工林土壤SOC、TN、TP含量及其计量比存在影响, 林龄38年的土壤SOC、TN、TP含量及C:N、C:P、N:P均高于林龄26年, 除C:N外, 其他差异均达显著水平。

(3) 林分密度对山茱萸人工林土壤SOC、TN、TP含量及其计量比均存在极显著影响, 但不同林龄下其影响不同, 林龄26年的土壤SOC、TN、TP含量均以密度A最高, 而38年的均以密度B最高; 林龄26年和38年的土壤C:N分别以密度C和D最高, 而C:P和N:P均是密度C最高, 表明密度C的C、P和N、P比例失衡更为严重。

(4) 研究区山茱萸人工林整体土壤TN与TP、C:N与C:P的最优关系可用二次函数表示, 前者达极显著水平, 后者不显著; 其他土壤SOC、TN、TP及计量比相互间呈显著或极显著线性关系。C:N和N:P主要受TN含量影响, C:P主要受TP含量影响。

综上所述, 在山茱萸人工林经营管理中, 可通过适量施加P肥来补充土壤P元素的不足, 调节各元素之间的计量比, 进一步促进群落发展。

参考文献 [References]

- 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, **29** (6): 1007-1019 [Zeng DH, Chen GS. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2005, **29** (6): 1007-1019]
- Mc Groddy ME, Daufresne T, Hedin LO. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios [J]. *Ecology*, 2004, **85** (9): 2390-2401
- 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 王芳. 不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, **36** (19): 6188-6197 [Jiang PP, Cao Y, Chen YM, Wang F. Variation of C, N, and P stoichiometry in plant tissue, litter, and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (19): 6188-6197]
- 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 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 [Zeng ZX, Wang KL, Liu XL, Zeng FP, Song TQ, Peng WX, Zhang H, Du H. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of North-west Guangxi [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2015, **39** (7): 682-693]
- Yang H, Luo YQ. Carbon : nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2011, **20** (2): 354-361
- 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化[J]. 植物生态学报, 2016, **40** (12): 1257-1266 [Zhou ZH, Wang CK. Changes of the relationships between soil and microbes in carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry during ecosystem succession [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2016, **40** (12): 1257-1266]
- 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, **38** (18): 6580-6593 [Wang LJ, Wang P, Sheng MY. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (18): 6580-6593]
- Wang MM, Chen HS, Zhang W. Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, southwest China [J]. *Sci Tot Environ*, 2018, **619-620**: 1299-1307
- Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger KM, Mooshammer M, Josep Peñuelas AR, Sardans J, Wanek W. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. *Ecol Monogr*, 2015, **85** (2): 133-155
- 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 张兴昌. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J]. 水土保持学报, 2017, **31** (2): 339-344 [Ren LL, Zhang BX, Han FP, Zhang XC. Ecological stoichiometric characteristics of soils in *Robinia pseudoacacia* forests of different ages on the Loess plateau [J]. *J Soil Water Conserv*, 2017, **31** (2): 339-344]
- 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, **33** (18): 5484-5492 [Zeng DP, Jiang LL, Zeng CS, Wang WQ, Wang C. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (18): 5484-5492]
- 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[J]. 生态环境学报, 2019, **28** (1): 73-82 [Zhang YJ, Wang KQ, Song YL, Li JW. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in subalpine of middle Yunnan province [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28** (1): 73-82]
- 蒋龙, 徐振锋, 吴福忠, 谭波, 游成铭, 李汉森, 刘一霖, 彭永翔, 曾合州, 杨万勤. 亚热带3种典型常绿森林土壤和植物叶片碳氮磷化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (4): 759-767 [Jiang L, Xu ZF, Wu FZ, Tan B, You CM, Li HS, Liu YL, Peng YX, Zeng HZ, Yang WQ. Stoichiometric characteristics of C, N, and P in soil and plant leaves in three typical evergreen forest types in subtropical zone [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, **25** (4): 759-767]
- 张泰东, 王传宽, 张全智. 帽儿山5种林型土壤碳氮磷化学计量关系的垂直变化[J]. 应用生态学报, 2017, **28** (10): 3135-3143 [Zhang TD, Wang CK, Zhang QZ. Vertical variation in stoichiometric relationships of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in the Maoershan region, Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28** (10): 3135-3143]
- 雷丽群, 卢立华, 农友, 明安刚, 刘士玲, 何远. 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 [Lei LQ, Lu LH, Nong Y, Ming AG, Liu SL, He Y. Stoichiometry characterization of soil C, N and P of *Pinus massoniana* plantations at different age stages [J]. *For Res*, 2017, **30** (6): 954-960]
- 曹娟, 闫文德, 项文化, 谌小勇, 雷丕锋. 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 [Cao J, Yan WD, Xiang WH, Shen XY, Lei PF. Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51** (7): 1-8]
- 张芸, 李惠通, 张辉, 黄彬彬, 刘春华, 蒋宗培, 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[J]. 生态学报, 2019, **39** (7): 2520-2531 [Zhang Y, Li HT, Zhang H, Huang BB, Liu CH, Jiang ZK, Ma XQ. Soil C:N:P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (7): 2520-2531]
- 曾凡鹏, 迟光宇, 陈欣, 史奕. 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤-根系C: N: P生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, **35** (7): 1819-1825 [Zeng FP, Chi GY, Chen X, Shi Y. The stoichiometric characteristics of C, N and P in soil and root of larch (*Larix* spp.) plantation at different stand ages in mountainous region of eastern Liaoning Province, China [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35** (7): 1819-1825]
- 胡启武, 聂兰琴, 郑艳明, 吴琴, 尧波, 郑林. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤C、N、P化学计量特征影响[J]. 生态学报, 2014, **34** (9): 2246-2255 [Hu QW, Nie LQ, Zheng YM, Wu Q, Yao B, Zheng L. Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliotii* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (9): 2246-2255]
- Tian LM, Zhao L, Wu XD, Fang HB, Zhao YH, Hu GJ, Yue GY, Sheng Y, Wu JC, Chen J, Wang ZW, Li WP, Zou DF, Ping

- C-L, Shang W, Zhao YG, Zhang GL. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland [J]. *Sci Tot Environ*, 2018, **622-623**: 192-202
- 21 陈涵兮, 海龙, 黄利民, 毛正荣, 柴彦君. 坡向对毛竹林土壤养分及其生态化学计量特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30** (9): 2915-2922 [Chen HX, Hai L, Huang LM, Mao ZR, Chai YJ. Effects of slope direction on soil nutrient and its ecological stoichiometry in bamboo forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30** (9): 2915-2922]
- 22 喻阳华, 钟欣平, 李红. 黔中石漠化区不同海拔顶坛花椒人工林生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2019, **39** (15): 5536-5545 [Yu YH, Zhong XP, Li H. Ecological stoichiometry of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes in rocky desertification area of central Guizhou [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (15): 5536-5545]
- 23 刘海威, 张少康, 焦峰. 氮磷添加对不同退耕年限草本植被群落及土壤化学计量特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, **31** (2): 333-338 [Liu HW, Zhang SK, Jiao F. Effects of nitrogen and phosphorus addition on community and soil stoichiometric characteristics of abandoned farmlands of different vegetation restoration years [J]. *J Soil Water Conserv*, 2017, **31** (2): 333-338]
- 24 刘莉, 蔡锰柯, 刘旭军, 韩海荣, 程小琴, 田慧霞, 郭庆林. 间伐对华北落叶松人工林叶、根及林下土壤C、N、P化学计量特征影响[J]. *东北林业大学学报*, 2019, **47** (8): 1-7 [Liu L, Cai MK, Liu XJ, Han HR, Chen XQ, Tian HX, Guo QL. Effects of thinning on ecological stoichiometry C, N and P in leaves, roots and soil of *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *J NE For Univ*, 2019, **47** (8): 1-7]
- 25 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第56卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1990 [Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. *Flora of China* (Vol. 56) [M]. Beijing: Science Press, 1990]
- 26 冯大奎, 瞿鸿模, 赵根柱, 魏厚晋, 李博党. 西峡县山茱萸生长的地质环境分析[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 1991, **21** (4): 57-62 [Feng DK, Qu HM, Zhao GZ, Wei HJ, Li BD. An analysis on geology environment of *Cornus officinalis* development in Xixia county [J]. *J Henan Univ (Nat Sci)*, 1991, **21** (4): 57-62]
- 27 杨得坡, 张铭哲, 何汝保. 河南省山茱萸的生态分布与区划[J]. *地域研究与开发*, 1991, **10** (4): 35-36 [Yang DP, Zhang MZ, He RB. Ecological distribution and regionalization of *Cornus officinalis* in Henan Province, China [J]. *Areal Res Dev*, 1991, **10** (4): 35-36]
- 28 周华山. 西峡县的地貌与国土整治[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 1988 (1): 17-25 [Zhou HS. Landforms and territorial control in Xixia Country [J]. *J Henan Univ (Nat Sci ed)*, 1988 (1): 17-25]
- 29 Wilding LP. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys [M]// Nielson DR, Bouma J. *Soil Spatial Variability* [M]. Wageningen: Purdoc, 1984: 166-193
- 30 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 [Wang SQ, Yu GR. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (8): 3937-3947]
- 31 汪宗飞, 郑粉莉. 黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, **38** (19): 6870-6880 [Wang ZF, Zheng FL. C, N, and P stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Ziuling region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (19): 6870-6880]
- 32 郭其强, 盘金文, 李慧娥, 高超, 孙学广, 杨菊. 贵州高原山地马尾松人工林土壤碳、氮、磷生态化学计量特性[J]. *水土保持学报*, 2019, **33** (4): 293-298 [Guo QQ, Pan JW, Li HE, Gao C, Sun XG, Yang J. Eco-stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of *Pinus massoniana* plantation in Plateau Mountainous area, Guizhou Province [J]. *J Soil Water Conserv*, 2019, **33** (4): 293-298]
- 33 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 黄宗胜, 石建华. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤C、N、P化学计量特征及互作关系[J]. *生态学报*, 2018, **38** (21): 7772-7781 [Li MJ, Yu LF, Du MF, Huang ZS, Shi JH. C, N, and P stoichiometry and their interaction with plants, litter, and soil in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different ages [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (21): 7772-7781]
- 34 孟庆权, 葛露露, 林宇, 邱岭军, 胡欢甜, 何宗明. 杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. *江西农业大学学报*, 2018, **40** (6): 1155-1162 [Meng QQ, Gg LL, Lin Y, Qiu LJ, Hu TT, He ZM. The stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in artificial *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2018, **40** (6): 1155-1162]
- 35 刘愿, 陈云明, 梁思琦, 陈晨. 陕北黄土丘陵区刺槐人工林土壤生态化学计量特征[J]. *水土保持研究*, 2019, **26** (4): 43-49 [Liu Y, Chen YM, Liang SQ, Chen C. Soil ecological stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation in the Loess Hilly region of northern Shaanxi Province [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2019, **26** (4): 43-49]
- 36 Achat DL, Bakker MR, Augusto L, Derrien D, Gallegos N, Lashchinskiy, N, Milin S, Nikitich P, Raudina T, Rusalimova O, Zeller B, Barsukov P. Phosphorus status of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia: effects of microbiological and physicochemical properties [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10** (2): 733-752
- 37 Tian HQ, Chen GS, Zhang C, Melillo JM, Hall CAS. 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
- 38 许宇星, 王志超, 竹万宽, 杜阿朋. 雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤化学计量特征[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2019, **34** (3): 486-493 [Xu YX, Wang ZC, Zhu WK, Du AP. Soil Ecological stoichiometric characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* in different ages on the Leizhou Peninsula [J]. *J Yunnan Agric Univ (Nat Sci)*, 2019, **34** (3): 486-493]
- 39 牛瑞龙, 高星, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 孙鹏跃, 白小芳. 秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, **36** (22): 7384-7392 [Niu RL, Gao X, Xu FL, Wang WL, Wang LL, Sun PY, Bai XF. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of soil and leaves from young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* growing in a Qinling Mountain plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (22): 7384-7392]
- 40 高君亮, 罗凤敏, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 陈晓娜, 段娜. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2019, **39** (15): 5594-5602 [Gao JL, Luo FM, Gao Y, Dang XH, Meng ZJ, Chen XN, Duan N. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of Northern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (15): 5594-5602]