

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

郭其强¹, 盘金文¹, 李慧娥², 高超¹, 孙学广¹, 杨菊¹

(1. 贵州大学森林资源与环境研究中心, 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要: 采用空间代替时间的方法, 选取贵州中部高原山地 8, 18, 26, 36 年生 4 个林龄的马尾松人工林为研究对象, 通过测定林下土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量, 分析不同发育阶段林分土壤养分变化规律及化学计量比特征。结果表明: 马尾松人工林土壤 SOC、TN、TP 平均值分别为 12.24, 1.94, 0.35 g/kg, C:N、C:P 和 N:P 平均值分别为 6.58, 38.70 和 13.65, C:N:P 的平均值为 39:6:1, 其养分含量总体不高。随土层深度增加, 4 个林龄土壤 SOC、TN 含量降低, 但 C:N 增加, TP、C:P 和 N:P 无明显变化规律。随林龄增加, 土壤 SOC、TN、N:P 先降低后升高, 而 TP 则持续降低; C:N 除在 36 年生林分中显著降低外, 其余各林分均无显著差异; C:P 无明显变化规律。相关分析表明, SOC、TN 是调控马尾松人工林土壤生态化学计量比的主要因素。研究结果可为进一步明确贵州高原山地马尾松人工林土壤养分循环特征提供重要参考。

关键词: 林龄; 马尾松人工林; 土壤总有机碳、全氮、全磷含量; 生态化学计量

中图分类号: S714.2; S791.248

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0293-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.041

Eco-stoichiometry Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus of *Pinus massoniana* Plantation in Plateau Mountainous Areas, Guizhou Province

GUO Qiqiang¹, PAN Jinwen¹, LI Huie², GAO Chao¹, SUN Xueguang¹, YANG Ju¹

(1. Institute for Forest Resources & Environment, College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025;

2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Using the method of space instead of time, *Pinus massoniana* plantations of 8, 18, 26 and 36 years old were selected as the research objects on plateau mountains, central part of Guizhou Province, and the content of soil organ carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were determined in the four plantations to analyze the variation law and stoichiometric characteristics of nutrient contents at different development stages. The results showed that the average value of SOC, TN and TP in four *P. massoniana* plantations at the different ages were 12.24 g/kg, 1.94 g/kg and 0.35 g/kg, respectively, and the average value of C:N, C:P and N:P were 6.58, 38.70 and 13.65, respectively. The average ecological stoichiometric ratio of C:N:P was 39:6:1. Generally, the soil nutrient was insufficient in the four *P. massoniana* plantations. Soil SOC and TN of the four plantations decreased with the increasing of soil layer depth, but C:N increased, while the change rule of TP, C:P and N:P was not obvious. With the increasing of plantations age, content of SOC and TN and N:P decreased first and then increased, and TP decreased persistently. Meanwhile, C:N significantly decreased in the 36-year-old plantation, but there was no significant difference in other plantations. There was no obvious change rule for C:P. The correlation analysis showed that soil SOC and TN were the main factors regulating the soil ecological stoichiometric ratio of *P. massoniana* plantations. These results could provide important reference for illuminating soil nutrient cycling of *P. massoniana* plantations in plateau mountains.

Keywords: forest age; *Pinus massoniana* plantation; content of soil total organ carbon, total nitrogen, total phosphorus contents; ecological stoichiometry

收稿日期: 2019-01-07

资助项目: 贵州省科技厅基础研究计划项目([2018]1040); 贵州省农业攻关项目([2019]2314); 广西创新驱动发展专项(A17204087-4); 贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007)

第一作者: 郭其强(1980—), 男, 博士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: hnguoqiqiang@126.com

通信作者: 李慧娥(1979—), 女, 副教授, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: huielish@126.com

生态化学计量学是研究土壤、植物及生态系统多种化学元素动态平衡的科学^[1-3],特别是在探讨森林土壤养分循环中应用广泛^[4-5]。土壤中有有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)是保持森林生态系统稳定存在的重要营养元素^[6],每种元素含量代表了土壤肥力^[7],两两比值反映了土壤养分循环和平衡特征^[8],其结果受成土母质、植被类型、环境条件等多种因素的综合影响^[9-10]。王霖娇等^[11]等研究发现,石漠化山地土壤 TN 含量增加有助于改善其理化性质和促进植物多样性;刘兴诏等^[12]研究发现,南亚热带森林演替过程中土壤 N:P 增加有助于地上植被器官中 N:P 增加,且 P 是植物生长的重要限制因子;但曹娟等^[13]研究发现,南方杉木人工林土壤不同深度 C:N:P 生态化学计量比变化不大,且相对稳定。由此可见,土壤 SOC、TN、TP 含量及其生态化学计量比随林分发育阶段及土壤深度不同而变化各异。近年来,有关森林土壤生态化学计量的研究已成为学者们关注的重要科学问题之一^[14],相关研究结论揭示森林土壤养分的供给状况、利用规律及反馈作用机制^[15],深化了对森林生态系统养分循环机制的认识和理解。

马尾松(*Pinus massoniana*)人工林作为我国重要的陆地生态系统,其面积和蓄积量均在全国居首位。已有研究^[16]表明,土壤肥力对马尾松人工林生产力的制约在土壤营养元素含量中已经凸显,尽管有人试图通过各种途径缓解或消除矛盾,但结果各异^[17-18]。鉴于此,本研究采用空间代替时间的方法,研究贵州省高原地区不同林龄马尾松人工林土壤

SOC、TN、TP 含量及其生态化学计量比,分析其随林龄及土层深度增加的分布规律,以期为明确马尾松人工林养分动态特征提供重要参考。

1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区孟关林场(26°26′—26°40′N,106°33′—106°66′E),属亚热带季风湿润区高原气候;年均气温 14.9℃,年均空气相对湿度约 80%;年均降水量 1 120 mm,主要集中在 5—8 月,约占全年降水量的 60%。地貌为贵州高原山地,海拔 1 100~1 300 m。土壤以黄壤、黄棕壤为主,pH 3.5~6.5。该林场为炼山后实生苗营造纯马尾松林,整地方式一致,造林后仅前 3 年进行砍灌、修枝等管理,在幼龄和中龄后期各进行 1 次抚育间伐后自然生长。林下灌木主要有菝葜(*Smilax china*)、南烛(*Vaccinium bracteatum*)、铁仔(*Myrsine africana*)和槲栎(*Quercus aliena*)等;草本有大果鳞毛蕨(*Dryopteris panda*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、野青茅(*Deyeuxia arundinacea*)、斑叶瑾菜(*Viola variegata*)和淡竹叶(*Lophatherum gracile*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

选取成土母岩、海拔、立地条件等较为一致的马尾松幼龄林(8 年生)、中龄林(18 年生)、近熟林(26 年生)和成熟林(36 年生),每个林龄林分中分别设置面积为 20 m×20 m 的典型样地 3 块,4 种林龄马尾松人工林样地基本特征见表 1。

表 1 不同林龄马尾松人工林基本特征

林分	海拔/m	成土母岩	土壤类型	坡向	坡度/(°)	郁闭度	平均胸径/cm	平均高度/m	平均枝下高/m	林木密度/(株·hm ⁻²)
幼龄林	1194	变质岩	黄壤	北	5	0.90±0.07	8.53±1.56	7.43±1.83	4.03±0.84	4675±256
中龄林	1175	变质岩	黄壤	北	6	0.85±0.10	12.66±2.55	15.64±2.74	11.23±1.36	2812±135
近熟林	1206	变质岩	黄壤	北	5	0.75±0.09	18.46±3.01	17.94±2.43	15.56±2.02	1356±103
成熟林	1214	变质岩	黄壤	北	8	0.80±0.08	21.26±5.26	20.87±3.26	17.02±2.25	1083±94

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

2.2 土样采集与测试方法

野外采样于 2017 年 8 月 5—20 日进行。在每个样地内沿对角线设置取样点 5 个,在挖取的土壤剖面上按 0—20,20—40,40—60 cm 土层深度取样,然后把每个样地相同土层样品去除杂质后混合,采用四分法各取土壤样品 500 g。带回实验室晾干,再用对角线法取样品 200 g,研磨后过 0.1 mm 筛备用,测定土壤 SOC、TN 和 TP 含量^[19]。SOC 含量采用硫酸重铬酸钾氧化—外加热法测定;TN 含量采用半微量定氮分析法测定;TP 含量采用钼锑抗比色法测定。

3 结果与分析

3.1 不同林龄及土层有机碳(SOC)含量变化

由表 2 可知,4 个林龄林分土壤 SOC 含量随土层深度增加趋于降低。不同林龄同土层中 SOC 含量表现为:在 0—20 cm 土层中,以近熟林最高,其次为幼龄林和成熟林,中龄林最低;在 20—40 cm 土层中,以近熟林最高,其余各林龄间均无显著差异($P > 0.05$);在 40—60 cm 土层中,以 8 年生林分最高,其次为 35 年生,而 18,26 年生最低。总体来看,4 个林龄马尾松人工林土壤 0—60 cm 土层平均 SOC 含量

依次为 12.33, 9.84, 14.92, 11.85 g/kg。方差分析表明, 近熟林土壤 SOC 最高, 其次为幼龄林和成熟林, 而近熟林最低。

3.2 不同林龄及土层全氮(TN)含量变化

由表 2 可知, 4 个林龄林分土壤 TN 含量随土层深度增加趋于降低。不同林龄同一土层中土壤 TN 含量表现为: 在 0—20 cm 土层中, 以近熟林最高, 其次为幼龄林和成熟林, 而中龄林最低; 在 20—40 cm 土层中, 以近熟林最高, 其次为中龄林和成熟林, 而幼龄林最低; 在 40—60 cm 土层中, 则为成熟林最高, 其次为幼龄林, 而中龄林和成熟林较低。总体来看, 4 个林龄马尾松人工林土壤 0—60 cm 土层平均 TN 含量依次为 1.95, 1.51, 2.32, 1.98 g/kg。方差分析表

表 2 不同林龄马尾松人工林各土层土壤 SOC、TN、TP 含量

单位: g/kg

土壤养分	土层深度/cm	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林
SOC	0—20	17.16±1.24Ba	11.61±1.35Ca	24.23±1.28Aa	16.34±1.47Ba
	20—40	10.53±1.12Bc	11.56±1.03Ba	13.70±1.40Ac	11.29±0.68Bb
	40—60	9.30±0.68Ac	6.36±1.32Cc	6.82±1.13Cd	7.92±0.67Bc
	均值	12.33±1.04Bb	9.84±1.26Cb	14.92±1.64Ab	11.85±0.92Bb
TN	0—20	3.08±0.13Ba	1.92±0.15Ca	3.87±0.12Aa	2.99±0.12Ba
	20—40	1.44±0.11Cc	1.70±0.18Bb	2.19±0.13Ab	1.77±0.16Bb
	40—60	1.33±0.24Ac	0.90±0.11Bb	0.89±0.08Bc	1.76±0.11Ab
	均值	1.95±0.15Bb	1.51±0.20Ca	2.32±0.17Ab	1.98±0.15Bb
TP	0—20	0.48±0.02Ba	0.62±0.04Aa	0.26±0.05Ca	0.29±0.03Ca
	20—40	0.42±0.01Ba	0.45±0.02Ab	0.22±0.02Ca	0.24±0.04Ca
	40—60	0.23±0.02Bb	0.40±0.03Ab	0.25±0.04Ba	0.28±0.03Ba
	均值	0.38±0.03Aa	0.49±0.02Ab	0.24±0.04Ba	0.27±0.03Ba

注: 同列不同大写字母表示不同林龄差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同小写字母表示不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

3.4 土壤 C : N、C : P、N : P 化学计量特征

从图 1 可以看出, 4 个林龄马尾松人工林 0—60 cm 土层中土壤 C : N 为 5.45~7.65, 平均值为 6.58, 变异系数为 6.28%; C : P 为 12.82~91.63, 平均值为 38.70, 变异系数为 56.20%; N : P 为 1.84~14.63, 平均值为 1 3.65, 变异系数为 27.07%。这说明各林龄林分土壤 C : N 和 N : P 较 C : P 稳定, 变异系数均不大。

明, 近熟林土壤 TN 含量最高, 其次为幼龄林和成熟林, 而中龄林最低。

3.3 不同林龄及土层全磷(TP)含量变化

由表 2 可知, 幼龄林和中龄林土壤 TP 含量随土层深度增加趋于降低; 而近熟林和成熟林土壤 TP 含量在不同土层深度间差异不显著 ($P > 0.05$)。不同林龄同土层中土壤 TP 含量表现为: 在 0—20, 20—40 cm 土层中, 均以中龄林最高, 其次为幼龄林, 而近熟林和成熟林最低; 在 40—60 cm 土层中, 以 18 年生最高, 其余各林龄林分较低, 且相互间差异均不显著 ($P > 0.05$)。总体来看, 4 个林龄马尾松人工林土壤 0—60 cm 土层平均 TP 含量表现为幼龄林和中龄林较高, 而近熟林和成熟林较低。

由图 1 可知, 不同林龄马尾松人工林随土层深度增加 C : N 趋于增加, 而 C : P 和 N : P 无明显规律。即不同林龄林分土壤 C : N 除幼龄林土层在 40—60 cm 深度较其上层稍有降低外, 总体均呈升高趋势; 而 C : P 和 N : P 变化趋势基本相同, 即在幼龄林和中龄林土层中均有小幅波动, 在近熟林和成熟林中快速降低。

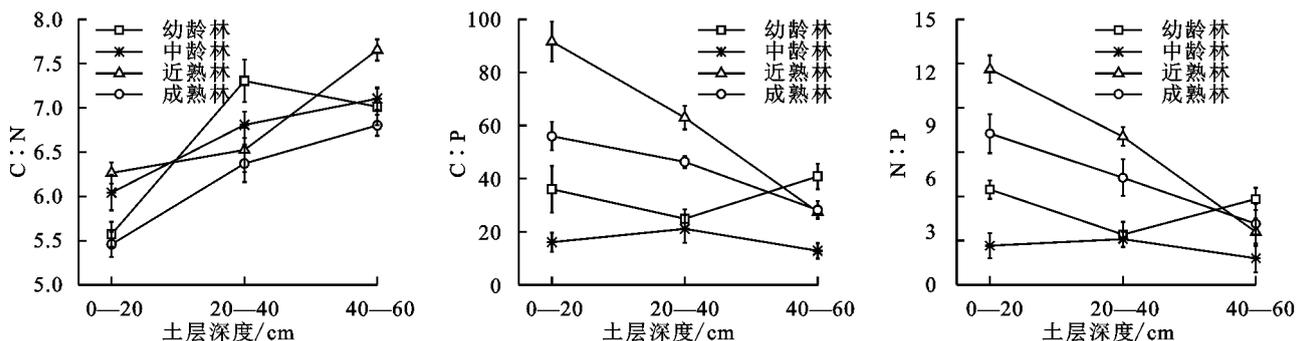


图 1 不同林龄马尾松人工林土壤 C : N、C : P 和 N : P 随土层深度增加的变化特征

由表 3 可知, 不同林龄马尾松人工林土壤中 C : N 变化范围为 6.21~6.81, 其中幼龄林、中龄林和近熟林均无显著差异, 而成熟林则显著降低; C : P 随林

龄变化各异, 具体表现为近熟林 > 成熟林 > 幼龄林 > 中龄林; 而 N : P 以近熟林和成熟林最高, 其次为幼龄林, 中龄林最低。

不同林龄马尾松人工林中 C : N : P 分别为 34 : 5 : 1, 17 : 3 : 1, 61 : 9 : 1 和 44 : 7 : 1。

表 3 不同林龄马尾松人工林土壤生态化学计量比特征

林龄	C : N	C : P	N : P	C : N : P			
				0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	平均值
幼龄林	6.63±1.43A	33.94±4.22C	5.24±2.54B	36 : 6 : 1	25 : 3 : 1	41 : 6 : 1	34 : 5 : 1
中龄林	6.65±0.94A	16.67±3.54D	2.52±0.87C	16 : 3 : 1	21 : 3 : 1	13 : 2 : 1	17 : 3 : 1
近熟林	6.81±1.02A	60.68±7.32A	9.41±2.05A	92 : 15 : 1	61 : 14 : 1	27 : 4 : 1	61 : 9 : 1
成熟林	6.21±0.84B	43.49±5.13B	7.22±2.15A	56 : 10 : 1	46 : 7 : 1	28 : 4 : 1	44 : 7 : 1

3.5 土壤 SOC、TN、TP 及 C : N、C : P、N : P 的相关性

从表 4 可以看出,不同林龄马尾松人工林土壤 SOC 与 TN 呈极显著正相关关系;C : N 与 TN 的相关性高于 SOC,而 C : P 与 SOC 的相关性高于 TN 和 TP;N : P 与 SOC 的相关性高于 TN。这表明研

究区不同林龄马尾松人工林土壤中 SOC 含量对 C : P、N : P 影响最大,其次为 TN 含量;TP 仅对 C : P 具有显著影响。

本研究中,土壤 N : P 与 SOC、TN 含量和 C : P 都表现为极显著相关性,表明 N : P 在受 SOC、TN 调控的同时,也与土壤 TP 含量密切相关^[20]。

表 4 不同林龄马尾松人工林土壤 SOC、TN、TP 及其计量比的相关性

项目	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
SOC	1	0.985**	-0.105	-0.684*	0.807**	0.849**
TN	0	1	-0.069	-0.787**	0.764**	0.827**
TP	0.746	0.831	1	-0.138	-0.627*	-0.569
C : N	0.014	0.002	0.670	1	-0.423	-0.539
C : P	0.002	0.004	0.029	0.171	1	0.989**
N : P	0	0.001	0.054	0.070	0	1

注:图中右上方为 Pearson 相关系数,左下方为 P 值;* 和 ** 分别表示二者呈显著和极显著相关关系($P < 0.05$ 和 $P < 0.01$)。

4 讨论

4.1 土层对马尾松人工林土壤 SOC、TN、TP 含量的影响

不同林龄马尾松人工林土壤 SOC、TN 含量均随土层深度的增加而降低,而 TP 含量随土层深度的增加总体差别不大,这与大多数研究结论一致^[13,21-22]。说明马尾松人工林中土壤 C、N 输入主要依靠地表枯枝落叶、动物残体及粪便分解输入,且主要集中在地表 0—10 cm 土层^[21,23],而后逐渐向下迁移,由此导致土壤表层 SOC、TN 含量较高。土壤中 TP 含量主要与土壤母质特性及区域位置有关^[24]。主要原因为:首先,研究区马尾松人工林下土壤石砾含量较多,风化速度慢且时间长,导致土壤 P 矿化速率较低;其次,研究区所在地为北亚热带南方黄壤区,土壤 TP 含量本身较低^[25]。

4.2 林龄对马尾松人工林土壤 SOC、TN、TP 含量的影响

随林龄增加,林分植株个体生物量增加导致林下土壤的养分格局也随之变化^[26]。本研究结果表明,马尾松人工林随林龄增加土壤 SOC、TN 含量先降低后升高,而 TP 含量则持续降低。这与以往的研究结论既有相同点又有不同点。有学者^[27-28]发现,马尾松和杉木人工林土壤 C、N 含量与林龄呈正比;也有研究^[29]发现,马尾松人工林幼龄林阶段因地力消耗少,

土壤中仍可保留较高的养分含量,中龄林至近成熟林阶段,林地生物量大量积累,加上抚育间伐使得林木密度降低,凋落物量减少,导致土壤肥力下降,到成熟林阶段,林地生产力逐渐趋于稳定,使得林地土壤肥力逐渐回升。本研究结论与后者基本相同。但不同点是:本研究马尾松人工林随林龄增加,林分平均高和乔木枝下高增加且密度降低,导致林下生存空间增加,为林下灌、草的生存与定居创造了有利条件,进而对土壤基质和养分输入产生积极影响^[30-31]。随林龄增加,地上植被对 P 需求增加导致土壤滞留的 TP 含量趋于降低。

4.3 土层、林龄对马尾松人工林土壤养分化学计量比的影响

土壤 C : N 是衡量土壤营养平衡状况的重要指标。当土壤中 C : N 较高时,微生物需要输入 N 素来满足自身的生长需要,当土壤 C : N 较低时,超过微生物生长所需要的 N 会被释放到土壤中^[32]。因此,较低的 C : N 表明土壤有机质的矿化速率更快,即释放养分的能力更强。研究区不同林龄马尾松人工林土壤 C : N 为 6.21~6.81,远低于我国土壤 C : N 平均值 11.9^[33],具体表现为幼龄林、中龄林和近熟林差异不显著,但均显著高于成熟林。其原因可能是到成熟林阶段林分结构趋于合理,林下物种多样性增加使得土壤矿化有机质能力增加^[34],导致 C : N 降

低。各林龄中,随土层深度增加 C : N 总体趋于升高。其原因可能是随林龄增加,植物根系向土层深处延伸并吸收养分所致。

土壤 C : P 是衡量土壤微生物矿化有机物释放 P 潜力的指标,C : P 较低说明土壤 P 有效性较高。土壤 C : P 以 200 为界限,高于该值时微生物 C 大幅增加,竞争土壤中的速效 P,导致 P 净固持于土壤中;低于该值时土壤微生物 C 增加,P 发生净矿化作用^[33]。研究区不同林龄和土层深度马尾松人工林土壤 C : P 分别为 33.94~60.68 和 12.82~91.63,低于我国土壤 C : P 均值 105^[27,32]。随林龄和土层深度增加土壤 C : P 无明显规律。

土壤 N : P 是反映 N 养分供应状况的重要指标^[35]。研究区不同林龄马尾松人工林土壤 N : P 为近熟林和成熟林较高,其次为幼龄林,而中龄林最低,而我国土壤 N : P 平均值为 5.20^[27,32]。本研究中,幼林阶段林分对土壤肥力需求相对较少,N : P 说明林地土壤肥力处于中等水平^[11],中龄林阶段林木个体生长迅速,对土壤养分需求增加,导致 N : P 较低;到近熟林和成熟林阶段,土壤 N 含量增加,使得 N : P 逐渐回升。相关分析也表明,土壤 SOC、TN 与 C : N、C : P、N : P 均呈显著或极显著相关,说明二者均是调控马尾松人工林土壤生态化学计量比的主要因素。

土壤 C : N : P 是判定土壤养分矿化与固持作用的重要指标^[2,36]。研究区不同林龄马尾松人工林土壤 C : N : P 分别为 34 : 5 : 1,17 : 3 : 1,61 : 9 : 1,44 : 7 : 1;而我国土壤 C : N : P 均值 60 : 5 : 1^[32]。该结果说明研究区除近熟林基本与我国平均水平持平外,其余各林龄林分土壤养分均较低。

5 结论

(1)贵州高原山区马尾松人工林随土层深度增加,土壤 SOC、TN 含量降低而 C : N 升高,TP 含量与 C : P 无明显规律。

(2)马尾松人工林在由幼龄林过渡到中龄林阶段土壤 SOC、TN 含量降低,但在近熟林和成熟林阶段趋于回升;随林龄增加土壤 TP 含量始终趋于降低。

(3)不同林分发育阶段,土壤 SOC、TN 含量一直为调控林地土壤生态化学计量比的主要因素。

参考文献:

[1] 程滨,赵永军,张文广,等.生态化学计量学研究进展[J].生态学报,2010,30(6):1628-1637.

[2] Zechmeister B S, Keiblinger K M, Mooshammer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. Ecological Monographs, 2015, 85(2):133-155.

[3] Galicia L, García O F. The effects of C, N and P additions on soil microbial activity under two remnant tree species in a tropical seasonal pasture[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 26(1):31-39.

[4] 赵航,贾彦龙,王秋凤.中国地带性森林和农田生态系统 C-N-P 化学计量统计特征[J].第四纪研究,2014,34(4):803-814.

[5] Müller M, Oelmann Y, Schickhoff U, et al. Himalayan treeline soil and foliar C : N : P stoichiometry indicate nutrient shortage with elevation[J]. Geoderma, 2017, 291:21-32.

[6] 周玮莹,杨明义.黄土高原坝控小流域土壤 C、N、P 计量特征解析[J].水土保持研究,2018,25(3):17-22.

[7] 张星星,杨柳明,陈忠,等.中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征[J].生态学报,2018,38(16):5828-5836.

[8] 刘超,王洋,王楠,等.陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J].植物生态学报,2012,36(11):1205-1216.

[9] Tian H, Chen G, 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 (1/3): 139-151.

[10] Bell C, Carrillo Y, Boot C M, et al. Rhizosphere stoichiometry: Are C : N : P ratios of plants, soils, and enzymes conserved at the plant species-level? [J]. New Phytologist, 2014, 201(2):505-517.

[11] 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.

[12] 刘兴诏,周国逸,张德强,等.南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J].植物生态学报,2010,34(1):64-71.

[13] 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.

[14] Yu Z P, Wang M H, Huang Z Q, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China[J]. Global Change Biology, 2018, 24(3):1308-1320.

[15] Zhang J H, Zhao N, Liu C C, et al. C : N : P stoichiometry in China's forests: From organs to ecosystems [J]. Functional Ecology, 2018, 32(1):50-60.

[16] Fan F H, Ding G J, Wen X P. Proteomic analyses provide new insights into the responses of *Pinus massoniana* seedlings to phosphorus deficiency [J]. Proteomics, 2016, 16(3):504-515.

[17] Liu L, Gundersen P, Zhang W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil microbial biomass and community structure in two reforested tropical forests[J]. Scientific Reports, 2015, 5:14378.

[18] 宋平.低磷胁迫下马尾松不同基因型对氮添加的感知

- 差异[D].北京:中国林业科学研究院,2017.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [20] 张晗,欧阳真程,赵小敏,等.江西省油菜土壤碳氮磷生态化学计量学空间变异性及影响因素[J].水土保持学报,2018,32(6):269-277.
- [21] 李明军,喻理飞,杜明凤,等.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.
- [22] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):184-190.
- [23] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- [24] 胡耀升,么旭阳,刘艳红.长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(3):632-638.
- [25] 张倩,韩贵琳,柳满,等.贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素[J].生态学杂志,2019,38(2):321-328.
- [26] 张蕾蕾,钟全林,程栋梁,等.刨花楠叶片碳氮磷化学计量比与个体大小的关系[J].应用生态学报,2015,26(7):1928-1934.
- [27] 崔宁洁,刘小兵,张丹桔,等.不同林龄马尾松人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J].生态环境学报,2014,23(2):188-195.
- [28] 吴明,邵学新,周纯亮,等.中亚热带典型人工林土壤质量演变及其环境意义[J].生态学杂志,2009,28(9):1813-1817.
- [29] 杨会侠,汪思龙,范冰,等.马尾松人工林发育过程中的养分动态[J].应用生态学报,2010,21(8):1907-1914.
- [30] 项文化,田大伦.不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究[J].植物生态学报,2002,26(1):89-95.
- [31] Hobbie S E. Plant species effects on nutrient cycling: Revisiting litter feedbacks[J]. Trends in Ecology and Evolution,2015,30(6):357-363.
- [32] Bengtsson G, Bengtson P, Månsson K F. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry,2003,35(1):143-154.
- [33] 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.
- [34] Krzic M, Newman R, Broersma K. Plant species diversity and soil quality in harvested and grazed boreal aspen stands of northeastern British Columbia[J]. Forest Ecology and Management,2003,182(1/3):315-325.
- [35] 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.
- [36] Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea[J]. Nature,2012,464(7292):1178.
- (上接第 174 页)
- [28] Vogeler I, Rogasik J, Funder U, et al. Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake[J]. Soil and Tillage Research,2009,103(1):137-143.
- [29] Martin-Rueda I, Muñoz-Guerra L M, Yunta F, et al. Tillage and crop rotation effects on barley yield and soil nutrients on a Calcicortidic Haploxeralf[J]. Soil and Tillage Research,2007,92(1/2):1-9.
- [30] Guan D H, Mahdi M, Al-Kaisi, et al. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. Field Crops Research,2014,157:89-97.
- [31] Chu P F, Zhang Y L, Yu Z W, et al. Winter wheat grain yield, water use, biomass accumulation and remobilisation under tillage in the North China Plain[J]. Field Crops Research,2016,193:43-53.
- [32] Shao Y H, Xie Y X, Wang C Y, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of North China[J]. European Journal of Agronomy,2016,81:37-45.
- [33] Pierce F J, Fortin M C, Staton M J. Immediate and residual effects of zone-tillage on soil physical properties and corn performance[J]. Soil and Tillage Research,1992,24:149-165.
- [34] 吕军杰,姚宇卿,王育红,等.不同耕作方式对坡耕地土壤水分及水分生产效率的影响[J].土壤通报,2003,34(1):74-76.
- [35] 顾秋蓓,杨琼,余涛,等.耕作措施对土壤有机碳稳定性的影响:以黑龙江省与吉林省典型地区为例[J].现代地质,2016,30(2):463-469.
- [36] 高飞,李霞,任佰朝,等.小麦玉米周年生产中耕作方式对夏玉米根系特性和产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(11):2141-2149.
- [37] Li H W, Gao H W, Wu H D, et al. Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China[J]. Australian Journal,2007,45(5):344-350.