

# 黄土丘陵区沙棘混交林叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征

吴旭<sup>1</sup>, 牛耀彬<sup>1</sup>, 陈云明<sup>2,3</sup>, 董从国<sup>2</sup>, 乔雨宁<sup>2</sup>

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**摘要:**以黄土丘陵区沙棘(*Hippophae rhamnoides*) + 油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*H. rhamnoides*) + 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)混交林( $H_rP_t$ 、 $H_rR_p$ )及油松( $P_t$ )和刺槐( $R_p$ )纯林为对象,测定叶片、凋落物和0—100 cm土壤C、N、P含量及其化学计量比,探究混交造林对不同组分间养分协同变化规律的影响。结果表明:(1)相比 $P_t$ 、 $H_rP_t$ 中油松叶片C、N、P含量( $p < 0.05$ )及N:P( $p > 0.05$ )增加,C:N和C:P降低( $p > 0.05$ ),表明 $H_rP_t$ 有助于缓解N限制,加快其生长速率;相比 $R_p$ 、 $H_rR_p$ 中刺槐叶片C、N含量及C:P和N:P降低,P含量及C:N增加( $p > 0.05$ ),表明 $H_rR_p$ 增强刺槐对P的吸收,但降低其对C和N的固存;(2)相比 $P_t$ 、 $H_rP_t$ 凋落物C、N、P含量及N:P增加,C:N和C:P降低( $p < 0.05$ ),表明 $H_rP_t$ 有助于加快凋落物分解,促进养分归还;相比 $R_p$ 、 $H_rR_p$ 凋落物C、N、P含量及其计量比均有所增加( $p > 0.05$ ),表明 $H_rR_p$ 对凋落物分解无显著作用;(3)相比 $P_t$ 和 $R_p$ 、 $H_rP_t$ 和 $H_rR_p$ 土壤C、N、P含量增加,但C:N和C:P降低( $p > 0.05$ ),表明 $H_rP_t$ 和 $H_rR_p$ 均有助于提高N和P利用效率,改善土壤养分状况;(4)叶片、凋落物化学计量指标间具有较强协同效应,且N、P相比C在不同组分间的相关性更明显。综上,相比 $H_rR_p$ 、 $H_rP_t$ 更有助于改善养分限制因子供给,加快组分间养分转化。研究结果对于揭示黄土高原地区人工混交林生态系统养分供应潜力及合理制定营林规划具有重要意义。

**关键词:**混交林;沙棘;油松;刺槐;黄土丘陵区;生态化学计量

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0369-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.050

## Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry Characteristics in Leaf, Litter and Soil at Mixed Forests of *Hippophae rhamnoides* in the Loess Hilly Region of China

WU Xu<sup>1</sup>, NIU Yaobin<sup>1</sup>, CHEN Yunming<sup>2,3</sup>, DONG Congguo<sup>2</sup>, QIAO Yuning<sup>2</sup>

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100;

3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Ecological stoichiometry focuses on the balance of chemical elements in ecological processes, in which the stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in different components are important features of ecosystem functions and processes. At present, it is not clear how the introduction of *Hippophae rhamnoides* (N-fixing) affects the nutrient cycling mechanism of ecosystem in N-fixing or non-N-fixing pure plantations. Therefore, two kinds of mixed forests (*H. rhamnoides* + *Pinus tabulaeformis*,  $H_rP_t$ ; *H. rhamnoides* + *Robinia pseudoacacia*,  $H_rR_p$ ) and the pure forests of *P. tabulaeformis* ( $P_t$ ) and *R. pseudoacacia* ( $R_p$ ) were selected. The C, N and P contents in leaf, litter and 0—100 cm soil layer were quantified, and the effects of mixed afforestation on the synergistic variation of nutrients among different components were explored. The results indicated that: (1) Compared with  $P_t$ , the C, N, P contents ( $p < 0.05$ ) and the N:P ( $p > 0.05$ ) increased, while C:N and C:P decreased ( $p > 0.05$ ) in the leaves of  $P_t$ .

收稿日期:2021-01-23

资助项目:山西省高等学校科技创新项目(2020L0141, 2020L0146);山西农业大学科技创新基金(博士科研启动)项目(2020BQ38, 2020BQ44);山西省优秀博士来晋工作奖励项目(SXYBK Y2020007)

第一作者:吴旭(1989—),女,博士,讲师,主要从事植物生理生态、矿区土地复垦研究。E-mail:13572569663@163.com

通信作者:陈云明(1967—),男,博士,研究员,主要从事林草恢复与重建原理、植被生态系统化学计量学研究。E-mail:ymchen@ms.iswc.ac.cn

*tabuliformis* in  $H_rP_t$ , indicating that  $H_rP_t$  was helpful to relieve the restriction of N and accelerate its growth rate. Meanwhile, compared with  $R_p$ , the C, N, C : P and N : P decreased, while P and C : N increased of  $R_p$ . *pseudoacacia* in  $H_rR_p$  ( $p > 0.05$ ), suggesting that  $H_rR_p$  might enhance the absorption of P by *R. pseudoacacia*, but the sequestration of C and N would be decreased. (2) The C, N, P contents and N : P of the litters in  $H_rP_t$  were significantly higher than those of  $P_t$ , and the C : N and C : P values were significantly lower than those of  $P_t$ , indicating that  $H_rP_t$  was helpful to accelerate the decomposition rate of litter and promote nutrient return. Compared with  $R_p$ , the C, N, P contents and their stoichiometric ratios of the litters in  $H_rR_p$  increased ( $p > 0.05$ ), suggesting that  $H_rR_p$  did not significantly promote the decomposition of litter. (3) Compared with  $P_t$  and  $R_p$ , the soil C, N and P contents in  $H_rP_t$  and  $H_rR_p$  increased, but C : N and C : P decreased ( $p > 0.05$ ), indicating that  $H_rP_t$  and  $H_rR_p$  were helpful to increase the utilization efficiency of N and P and improve the soil nutrient status. (4) The main stoichiometric indicators between leaf and litter had a strong synergistic effect. In addition, the correlation of N and P elements in leaf, litter and soil was more obvious than that of the C element. In summary, compared with  $H_rR_p$ ,  $H_rP_t$  was more helpful to improve the supply of nutrient limiting factors and accelerate the conversion of nutrients among different components. The research results are of great significance for revealing the nutrients supply potential of the artificial mixed forest ecosystem in the Loess Plateau and formulating a reasonable forest management plan.

**Keywords:** mixed forest; *Hippophae rhamnoides*; *Pinus tabuliformis*; *Robinia pseudoacacia*; loess hilly region; ecological stoichiometry

人工造林是黄土高原植被建设的重要措施,油松(*Pinus tabuliformis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)因具有耐干旱、适应能力强等特点,成为该区域主要造林树种。目前黄土高原地区保存人工林面积 747 万  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。然而,该地区大部分人工林结构单一,生长状况较差,生态系统功能较低。相比人工纯林,混交林能明显改善土壤养分状况,提高林地生产力和林分稳定性。经过长期造林实践,沙棘(*Hippophae rhamnoides*)因具有抗旱、耐瘠薄、固氮肥土等特点,多与其他树种进行混交造林。目前,有关沙棘混交林的研究主要侧重于林地水文效应及水土保持功能<sup>[2]</sup>,而在固氮或非固氮人工纯林中,沙棘(固氮树种)的引入如何影响生态系统养分循环机制尚不清楚。

氮(N)、磷(P)等营养元素是维持植物生存和生长的重要因素,与结构性元素碳(C)相互作用,在植物生长过程中协同变化,共同制约生态系统中的关键过程。混交造林不仅通过改变元素含量,而且通过调节元素组成平衡关系对生态系统养分循环进行调控<sup>[3]</sup>。生态化学计量能够揭示元素在生态系统中的可获得性及限制状况,阐明 C、N、P 等元素循环和平衡机制,反映生态系统中不同组分之间相互依赖、相互制约的关系,已成为混交造林对生态系统不同组分养分供应、分配规律及其协同变化关系影响研究的重要手段<sup>[4]</sup>。

不同树种混交对生态系统不同组分化学计量特征的影响不同。已有研究<sup>[5]</sup>表明,白蜡(*Fraxinus chinensis*)与刺槐混交导致土壤 C 含量降低,而臭椿

(*Ailanthus altissima*)与刺槐混交显著增加土壤 C 含量。台湾桤木(*Alnus formosana*)与巨桉(*Eucalyptus grandis*)混交可显著增加土壤 C、N、P 含量及凋落物 P 含量<sup>[6]</sup>。油松与蒙古栎(*Quercus mongolica*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)混交并未显著改变油松叶片 P 含量,却显著降低叶片 N 含量<sup>[7]</sup>。可见,合理的混交模式可显著提高不同组分 C、N、P 含量及有效性。植物、凋落物和土壤作为生态系统能量流动和物质循环的流动环节和主要存储库,彼此之间存在着结构及功能间的紧密联系,共同决定生态系统的养分循环特征。目前,国内外关于人工林叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征的研究<sup>[8]</sup>已有诸多报道,这些研究从不同时间或空间尺度分析了各组分之间的养分关系,丰富了生态系统的化学计量特征数据库。然而,已有研究主要集中在纯林,而将人工林生态系统作为一个整体来探讨混交造林对生态系统养分循环影响研究相对较少,因此,解开人工混交林生态系统养分供应与平衡机制仍需要大量研究工作。

鉴于此,本研究以黄土丘陵区沙棘+油松( $H_rP_t$ )、沙棘+刺槐( $H_rR_p$ )混交林及油松( $P_t$ )、刺槐( $R_p$ )纯林为对象,运用生态化学计量手段,对生态系统不同组分(叶片、凋落物、土壤)的 C、N、P 含量进行测定与分析,剖析纯林和混交林之间 C、N、P 含量、化学计量比的变化及其相互之间的关联性;揭示生态系统各组分之间养分动态平衡关系随着树种混交的变化特征,为黄土高原地区制定营林规划提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞区境内,试验地选在中国科学院安塞水土保持综合试验站的山地试验场(109°19'E,36°51'N),海拔1 068~1 309 m,属典型黄土丘陵沟壑区。该区具有典型暖温带半干旱气候,1985—2017年平均气温8.8℃,年均降水量(458±172.5)mm,年际年内分布不均;年均潜在蒸发量1 000 mm。研究区内主要木本植物有沙棘、油松、刺

槐、侧柏等;草本植物主要有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)等。土壤以黄绵土为主,土壤容重1.15~1.35 g/cm<sup>3</sup>,pH 8.4~8.6。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验材料 以山地试验场野外长期固定监测林地为基础,选取沙棘+油松( $H_rP_t$ )、沙棘+刺槐混交林( $H_rR_p$ )及油松( $P_t$ )、刺槐( $R_p$ )纯林为对象。各样地均为2000年左右栽植的人工林,其基本特征见表1。

表1 样地基本特征

| 样地类型     | 树种                            | 树高/m      | 胸径(地径)/cm | 冠幅(东南×西北)/m             | 林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> ) |
|----------|-------------------------------|-----------|-----------|-------------------------|----------------------------|
| $H_rP_t$ | 沙棘( <i>H. rhamnoides</i> )    | 3.08±0.14 | 5.43±0.33 | (2.01±0.09)×(2.04±0.11) | 2650                       |
|          | 油松( <i>P. tabulaeformis</i> ) | 4.01±0.17 | 7.11±0.48 | (2.62±0.12)×(2.60±0.14) |                            |
| $H_rR_p$ | 沙棘( <i>H. rhamnoides</i> )    | 2.69±0.10 | 4.63±0.32 | (1.79±0.10)×(1.80±0.09) | 1960                       |
|          | 刺槐( <i>R. pseudoacacia</i> )  | 5.92±0.52 | 7.80±1.02 | (3.36±0.35)×(3.25±0.34) |                            |
| $P_t$    | 油松( <i>P. tabulaeformis</i> ) | 3.69±0.09 | 7.43±0.27 | (2.96±0.12)×(3.36±0.11) | 1200                       |
| $R_p$    | 刺槐( <i>R. pseudoacacia</i> )  | 7.59±0.65 | 9.40±1.50 | (4.36±0.39)×(4.24±0.32) | 500                        |

注:表中数据为平均值±标准差;样地调查(胸径/地径、树高等)于生长季前进行(4月)。

1.2.2 样品采集与测定 本研究中将同一区域相邻间隔区作为重复样地,即每个样地均先选取20 m×20 m的样方,然后再划分为20 m×6 m的3个小样方作为样地重复,于2018年生长季(5—10月)对其开展相应的研究。

根据每个样地内每木检尺结果,按照平均胸径/地径—平均树高—平均冠幅分别选取标准木3株,于每月月末采集各标准木的叶片样品(用高枝剪在树冠处选择健康成熟叶分东西南北4个方位采摘混匀);每个样地内按对角线法选取3个有代表性的1 m×1 m的凋落物小样方,收集样方内地表凋落物,并用土钻法在对应的样方内钻取1个1 m深(按0—10,10—20,20—50,50—100 cm)的土芯。每份样品均采集300 g左右,带回实验室后,植物叶片和凋落物样品杀青后均在85℃下烘至恒重,用粉碎机粉碎;土壤样品剔除石粒和杂草,经过自然风干后磨碎,样品均过0.25 mm筛,分别装入塑封袋备用。

所有样品分别采用重铬酸钾—外加热法(GB 7857—87)、凯氏定氮法(KDY—9830,KETUO)和硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法(UV—2450紫外分光光度计)测定其C、N、P含量。

### 1.3 数据处理

采用SPSS 19.0软件对数据进行分析,用Sigma Plot 12.0软件进行绘图。在对数据进行正态分布和方差齐性检验的基础上,采用方差分析(ANOVA)对同一树种不同造林模式条件下叶片、凋落物和土壤C、N、P含量及其比值差异性进行检验。采用R 3.5.3对植物叶片—凋落物—土壤之间的化学计量特征进

行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 纯林和混交林叶片C、N、P含量及其计量比特征

各树种叶片计量特征见表2。不同树种叶片C含量为420.73~505.69 g/kg,相比纯林, $H_rP_t$ 中油松显著增加2.35%, $H_rR_p$ 中刺槐减少1.45%;叶片N含量为11.80~32.30 g/kg,相比纯林, $H_rP_t$ 中油松显著增加45.59%, $H_rR_p$ 中刺槐减少1.80%;叶片P含量为0.82~1.55 g/kg,相比纯林, $H_rP_t$ 中油松显著增加25.61%, $H_rR_p$ 中刺槐增加1.97%。叶片C:N变化范围为13.24~43.09,相比纯林, $H_rP_t$ 中油松减少6.29%, $H_rR_p$ 中刺槐增加2.64%;叶片C:P变化范围为284.55~615.59,相比纯林, $H_rP_t$ 中油松显著减少12.99%, $H_rR_p$ 中刺槐减少0.10%;叶片N:P变化范围为13.50~21.54,相比纯林, $H_rP_t$ 中油松增加7.11%, $H_rR_p$ 中刺槐减少2.79%。

### 2.2 纯林和混交林凋落物C、N、P含量及其计量比特征

纯林和混交林凋落物计量特征见表3。不同林分凋落物C含量为268.70~498.42 g/kg,与纯林相比, $H_rP_t$ 和 $H_rR_p$ 分别显著增加28.55%和60.10%;凋落物N含量为6.53~24.44 g/kg,与纯林相比, $H_rP_t$ 和 $H_rR_p$ 分别显著增加163.09%和39.90%;凋落物P含量为0.42~1.15 g/kg,与纯林相比, $H_rP_t$ 显著增加92.86%, $H_rR_p$ 增加16.16%。凋落物C:N变化范围为17.72~59.84,与纯林相比, $H_rP_t$ 显著减少35.21%, $H_rR_p$ 增加0.62%;凋落物C:P变化范围276.21~919.49,与纯林相比, $H_rP_t$ 显著减少

29.87%,  $H_rR_p$  显著增加 46.55%; 凋落物 N:P 变化范围 15.46~22.66, 与纯林相比,  $H_rP_i$  和  $H_rR_p$  分别显著增加 39.07% 和 28.09%。

**2.3 纯林和混交林土壤 C、N、P 含量及其计量比特征**  
不同树种纯林和混交林土壤 C、N 含量均随土层深度增加而减少, 而 P 含量则基本保持不变(图 1)。

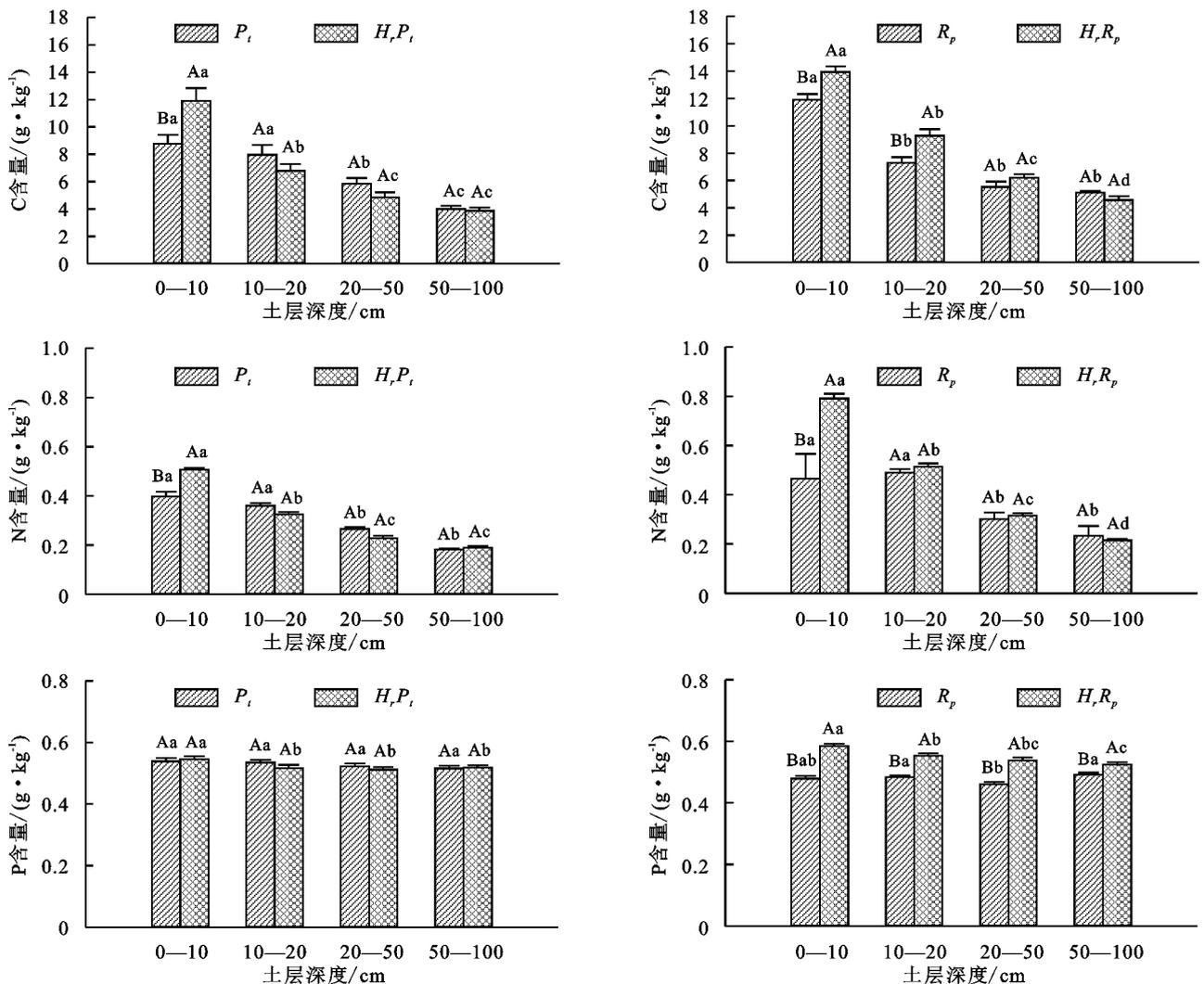
表 2 纯林和混交林各树种叶片 C、N、P 含量及其计量比

| 树种       | C/(g·kg <sup>-1</sup> ) | N/(g·kg <sup>-1</sup> ) | P/(g·kg <sup>-1</sup> ) | C:N         | C:P           | N:P         |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------------|-------------|
| $P_i$    | 494.09±3.04b            | 11.80±0.42b             | 0.82±0.02b              | 43.09±1.56a | 615.59±17.98a | 13.50±0.35a |
| $H_rP_i$ | 505.69±3.02a            | 17.18±1.21a             | 1.03±0.08a              | 40.38±0.90a | 535.60±26.33b | 14.46±0.71a |
| $R_p$    | 426.94±3.13a            | 32.30±0.34a             | 1.52±0.04a              | 13.24±0.11a | 284.83±7.29a  | 21.54±0.55a |
| $H_rR_p$ | 420.73±3.54a            | 31.72±1.20a             | 1.55±0.08a              | 13.59±0.40a | 284.55±10.91a | 20.94±0.60a |

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示同一树种不同造林模式间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

表 3 纯林和混交林凋落物 C、N、P 含量及其计量比

| 林分类型     | C/(g·kg <sup>-1</sup> ) | N/(g·kg <sup>-1</sup> ) | P/(g·kg <sup>-1</sup> ) | C:N         | C:P           | N:P         |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------------|-------------|
| $P_i$    | 387.73±23.27b           | 6.53±0.13b              | 0.42±0.01b              | 59.84±3.93a | 919.49±56.82a | 15.46±0.24b |
| $H_rP_i$ | 498.42±9.61a            | 17.18±1.21a             | 0.81±0.04a              | 38.77±6.37b | 644.87±26.48b | 21.50±1.45a |
| $R_p$    | 268.70±17.81b           | 17.47±2.33b             | 0.99±0.03a              | 17.72±0.83a | 276.21±18.09b | 17.69±2.17b |
| $H_rR_p$ | 430.19±8.08a            | 24.44±0.61a             | 1.15±0.08a              | 17.83±0.50a | 404.78±20.25a | 22.66±1.05a |



注:不同大写字母表示同一土层不同造林模式间差异显著( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一造林模式不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图 1 纯林和混交林土层 C、N、P 含量

树种混交对土壤 C、N、P 含量的影响有所差异, 其中在 0—10 cm 土层,  $H_rP_i$  和  $H_rR_p$  土壤 C、N 含量均显著高于  $P_i$  和  $R_p$ ; 在 10—20 cm 土层,  $H_rR_p$

土壤 C 含量显著高于  $R_p$ ; 而其余各土层, 两者之间 C、N 含量未表现出显著差异。  $H_rP_i$  与  $P_i$  不同土层土壤 P 含量均无显著差异; 而  $H_rR_p$  不同土层土壤 P

含量均显著高于  $R_p$ 。

除土壤 C : N 外,不同树种纯林和混交林土壤 C : P、N : P 均随土层深度增加而减少(图 2)。在 0—10

cm 土层,  $H, R_p$  与  $R_p$  土壤 C : N 和 N : P,  $H, P_t$  与  $P_t$  土壤 C : P 和 N : P 具有显著差异;而其余各土层,两者之间 C : N、C : P 和 N : P 无显著差异。

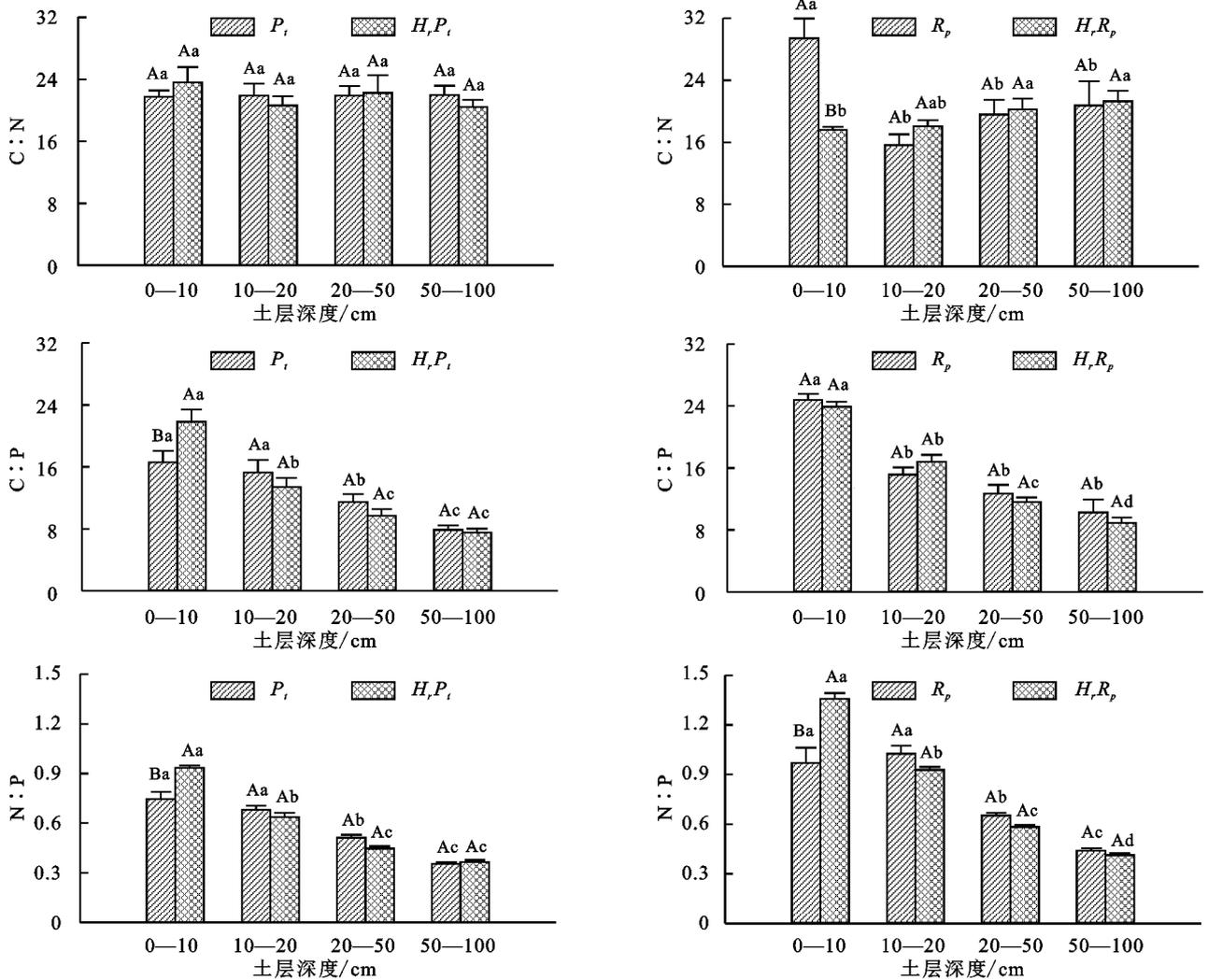


图 2 纯林和混交林土层计量比特征

土壤 C、N、P 含量及其计量比受造林模式、土层深度及二者的交互作用的影响程度各不相同(表 4)。对于  $P_t$  与  $H, P_t$ , 土壤 C、N 含量及 C : P、N : P 主要受土层深度及二者交互作用的影响 ( $p < 0.01$ ); P

含量受土层深度的影响 ( $p < 0.05$ ); 对于  $R_p$  与  $H, R_p$ , 土壤 C、N、P 含量受土层深度、造林模式及二者交互作用的影响 ( $p < 0.05$ ); C : N、C : P、N : P 主要受土层深度及二者交互作用的影响 ( $p < 0.05$ )。

表 4 土层深度和造林模式对土壤 C、N、P 含量及其计量比的影响

| 林分类型                | 变异来源        | C/(g · kg <sup>-1</sup> ) |        | N/(g · kg <sup>-1</sup> ) |        | P/(g · kg <sup>-1</sup> ) |        | C : N |        | C : P  |       | N : P   |       |
|---------------------|-------------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|-------|---------|-------|
|                     |             | F                         | p      | F                         | p      | F                         | p      | F     | p      | F      | p     | F       | p     |
| $P_t \times H, P_t$ | 土层深度        | 50.471                    | 0*     | 276.348                   | 0*     | 3.374                     | 0.020* | 0.454 | 0.715  | 36.141 | 0*    | 166.262 | 0*    |
|                     | 造林模式        | 0.291                     | 0.591  | 2.414                     | 0.123  | 0.593                     | 0.443  | 0.019 | 0.890  | 0.163  | 0.687 | 1.915   | 0.169 |
|                     | 土层深度 × 造林模式 | 6.590                     | 0*     | 23.804                    | 0*     | 0.832                     | 0.479  | 0.575 | 0.632  | 4.081  | 0.008 | 12.366  | 0*    |
| $R_p \times H, R_p$ | 土层深度        | 108.490                   | 0*     | 103.796                   | 0*     | 5.693                     | 0.001* | 4.668 | 0.004* | 76.257 | 0*    | 90.748  | 0*    |
|                     | 造林模式        | 4.098                     | 0.045* | 11.423                    | 0.001* | 149.233                   | 0*     | 2.543 | 0.113  | 2.661  | 0.105 | 0.347   | 0.557 |
|                     | 土层深度 × 造林模式 | 7.308                     | 0*     | 33.550                    | 0*     | 6.545                     | 0*     | 6.563 | 0*     | 3.016  | 0.032 | 22.655  | 0*    |

注: \* 表示  $p < 0.05$ 。

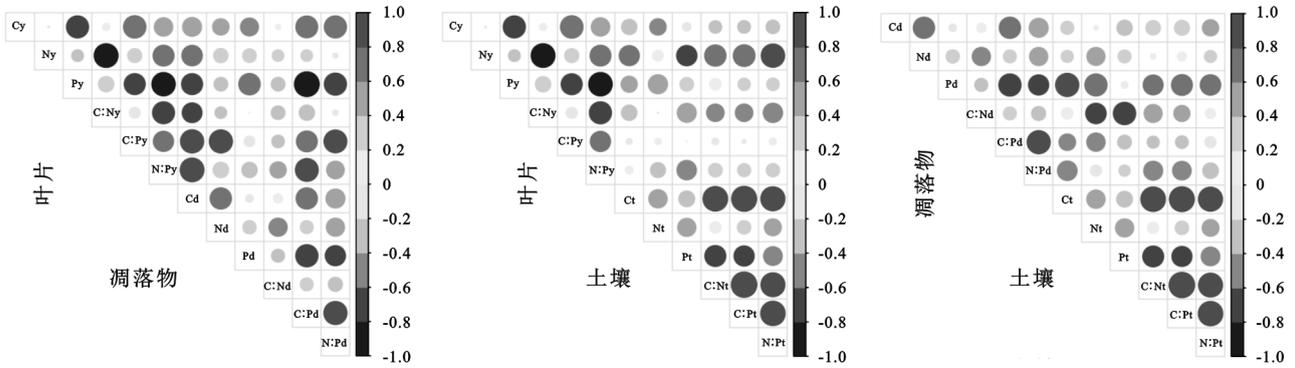
## 2.4 叶片、凋落物和土壤 C、N、P 含量及其计量比的相关性分析

相关性分析结果(图 3)表明,叶片 C 含量与凋落

物 C : P、N : P、叶片 N 含量与凋落物 C 含量、叶片 P 含量与凋落物 P 含量、叶片 C : P 与凋落物 C、N、C : P、N : P、叶片 N : P 与凋落物 C、C : P 呈显著正

相关( $p < 0.05$ ); 叶片 P 含量与凋落物 C、C:P、N:P 呈显著负相关( $p < 0.05$ ); 叶片 N 含量与土壤 C、C:N、C:P、N:P 呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 而与土壤 P

含量呈显著负相关( $p < 0.05$ ); 凋落物 P 含量与土壤 C、N、C:N、C:P、N:P 呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 凋落物 C:N 与土壤 N、P 含量呈显著负相关( $p < 0.05$ )。



注: 字母 y、d、t 分别代表叶片、凋落物、土壤, 显著水平( $p < 0.05$ )。

图 3 植物叶片、凋落物、土壤 C、N、P 及其化学计量比的相关关系

### 3 讨论

#### 3.1 混交造林对叶片 C、N、P 含量及其计量比的影响

本研究中, 不同造林模式条件下油松叶片平均 C 含量为 499.89 g/kg, 刺槐叶片平均 C 含量为 423.84 g/kg。其中, 刺槐低于全球 492 种陆生植物叶片的 464.00 g/kg<sup>[9]</sup>, 油松则大于以上水平。针叶树种叶片 C 含量偏高可能是由于常绿针叶树富含单宁、酚类等化合物<sup>[10]</sup>。此外, 沙棘与油松、刺槐混交, 油松叶片 C 含量显著增加, 而刺槐 C 含量减少, 表明  $H_rP_t$  更有利于油松叶片 C 含量积累。不同造林模式条件下油松叶片平均 N 含量为 14.49 g/kg, 刺槐叶片平均 N 含量为 32.01 g/kg。其中, 刺槐大于中国 753 种植物叶片 N 平均含量(20.24 g/kg)<sup>[11]</sup>; 而油松均小于以上水平, 主要是由于刺槐具有较强的固氮能力。此外, 相比纯林,  $H_rP_t$  显著增加油松叶片 N 含量, 非固氮和固氮树种混交, 可能存在 N 共享<sup>[12]</sup>。不同造林模式条件下刺槐叶片 P 平均含量为 1.54 g/kg, 虽低于全球水平 1.77 g/kg, 但与中国植物叶片 P 平均含量相近<sup>[13]</sup>; 油松叶片 P 平均含量为 0.93 g/kg, 小于以上研究水平。此外, 相比纯林, 混交林中各树种叶片 P 含量均升高, 研究<sup>[14]</sup>表明, 固氮植物结瘤固氮作用可促进有机酸的分泌, 使根际土壤酸化, 增加土壤中难溶态磷的活性, 从而促进植物对从土壤中吸收更多的 P。叶片 C:N 和 C:P 作为重要的生理指标, 可以反映植物生长的速率, 且成反比关系。本研究中,  $H_rP_t$  降低油松叶片 C:N 和 C:P, 表明  $H_rP_t$  有利于加快油松的生长。植物叶片 N:P 可反映环境对植物生长养分供应状况。本研究中,  $P_t$  受 N 的限制( $N:P < 14$ ), 而与固氮树种沙棘的混交过程缓解了 N 限制( $N:P > 14$ );  $R_p$  和  $H_rR_p$  主要受 P 限制( $N:P > 16$ )。

#### 3.2 混交造林对凋落物 C、N、P 含量及其计量比的影响

除  $P_t$ (C, 387.73 g/kg; N, 6.53 g/kg; P, 0.42 g/kg)外, 其余林分凋落物 C、N、P 平均含量分别为 424.99, 20.64, 1.00 g/kg, 与全球水平、国内多数陆地植物凋落物 C(371.1~522.1 g/kg)、N(8.0~16.6 g/kg)、P(0.4~1.3 g/kg)相比<sup>[15]</sup>,  $P_t$  整体呈现中 C 低 N、P 的元素格局, 而其余林分 N 较高, C 和 P 处于平均水平。凋落物 C:N 和 C:P 一定程度上决定其分解速率和养分归还速率, 特别是较低的 C:N 表明凋落物更易分解。本研究中, 刺槐 C:N(17.78)显著小于油松 C:N(49.31), 表明与阔叶树种相比, 针叶树种林下调落物更不易分解。此外, 与  $P_t$  相比,  $H_rP_t$  凋落物 C:N 有所下降。混交林中地表凋落物量及其养分含量整体高于纯林, 且固氮树种凋落物的分解速率大于, 二者混交可加速非固氮树种凋落物的分解速率<sup>[16]</sup>。张鼎华等<sup>[17]</sup>研究表明, 刺槐和杨树(*Populus tomentosa*)混交后可显著降低混交林中凋落物的 C:N 值, 加快其分解速度, 进而提高土壤肥力。不同林分凋落物 N:P(15.46~22.66)与国内多数陆地植物 N:P(13~20)相近, 表明其具有相对较强的分解能力<sup>[15]</sup>。

#### 3.3 混交造林对土壤 C、N、P 含量及其计量比的影响

本研究中, 不同造林模式条件下土壤 P 平均含量(0.53 g/kg)明显低于全球和全国水平(2.80, 0.78 g/kg)<sup>[15]</sup>。根据全国第二次土壤普查养分分级标准, 研究区土壤 P 含量属于 4 级(中下水平)<sup>[18]</sup>, 这主要和该区域干旱少雨的气候条件以及土壤对 P 的吸附作用有关。土层深度对土壤 C、N 含量影响显著, 而对 P 含量影响较小(图 1), 这与土层中 C、N、P 来源差异有关<sup>[19]</sup>。土壤中 P 主要来源于岩石的风化和淋溶, 且以

沉积的形式存在和贮存,在土壤中迁移量相对较少,因此P在整个土层中分布比较均匀。随土层深度增加,不同造林模式条件下土壤C、N含量呈下降趋势,表明C、N具有表聚性,这与以往研究<sup>[20]</sup>结果相似。可能由于表层土壤植物根系及分泌物较多,微生物活跃,有利于凋落物及其他代谢产物分解转化和腐殖质形成。本研究还发现,随土层深度增加,土壤C:P和N:P也呈降低趋势(图2),这可能由于微生物活动及有机质向下淋溶迁移减缓,导致C、N含量下降,从而随土层深度增加,N的限制作用增强。

总体来说, $H_iP_i$ 和 $H_iR_p$ 土壤C和N均高于 $P_i$ 和 $R_p$ ,这主要是由于沙棘根系的结瘤固氮作用以及混交林地凋落物积累量增加,促进C、N释放。 $H_iP_i$ 表层(0—10 cm)土壤C、N含量及C:P、N:P与 $P_i$ 具有显著差异,说明沙棘与油松混交对表层土壤C、N、P含量及其矿化速率影响较大,更有利于表层土壤C、N储存。 $H_iR_p$ 的0—20 cm土壤C含量、0—10 cm土壤N含量及N:P、0—100 cm土壤P含量高于 $R_p$ ,一方面,可能由于混交提高林下凋落物量,增强土壤微生物活性,增加土壤C、N含量;另一方面,可能沙棘和刺槐的固氮作用,减少植物对土壤N的吸收,同时由于固氮植物根系能够分泌有机酸等物质,活化土壤中难溶态磷,进而促进土壤P含量的积累。此外,土壤C:N与土壤有机质分解速率呈反比关系,C:P则与土壤P有效性呈反比<sup>[19]</sup>。本研究中,2种混交林土壤C:N和C:P均较纯林低,表明混交造林不仅提高土壤C、N、P含量,且土壤有机质的分解速率以及土壤P的有效性也较纯林高,这与张藤子等<sup>[7]</sup>的研究结果一致。 $H_iP_i$ 、 $H_iR_p$ 可能通过凋落物及对养分的吸收,改善土壤的化学计量比,在提高土壤养分含量的基础上进一步改善土壤养分比例。

### 3.4 叶片、凋落物、土壤C、N、P及化学计量比的关联性

生态系统不同组分元素含量及其计量比之间的协调关系有助于揭示养分之间的耦合过程。本研究中,C、N、P含量及其化学计量比在叶片、凋落物、土壤三者均存在显著相关性,表明在生态系统内部叶片、凋落物、土壤中的主要化学计量指标之间具有明显的耦合性,体现了养分含量间的共变形和传承性;然而,C、N、P含量及其化学计量比在叶片、凋落物、土壤三者之间,各自的相关性又明显优于两两之间。两两间的相关性主要表现为叶片与凋落物中C、N、P及其计量比具有较好的相关关系,说明二者之间存在养分转移,这与以往研究<sup>[21]</sup>结果相似。而叶片C、N、

P含量中只有N与土壤C、N、P及其计量比呈现一定相关关系,表明N元素相比C和P元素在叶片与土壤二者之间的相关性更显著,这可能是由于混交林中固氮树种的引入,其对环境中N元素的依赖性低,具有更高的N内稳性<sup>[22]</sup>。与C和N元素相比,凋落物中P含量与土壤C、N、P及其计量比之间存在较强的相关性,可能是由于土壤中C、N的获得途径多样,主要源自凋落物和植物根系分解形成的有机质,其中N元素还源自大气沉降和生物固氮,而土壤中P的获取途径相对单一<sup>[23]</sup>。此外,相比纯林,混交林可以显著改变林下土壤微生物群落结构及根系分泌物组分与数量等条件,最终可能导致林内各组成树种化学计量特征的差异<sup>[24-25]</sup>。研究植物—凋落物—土壤C、N、P化学计量特征之间的相互关系,运用生态化学计量学方法揭示C、N、P元素在整个生态系统中的变化格局以及养分的调控机制,对于科学评价人工混交林生态系统养分利用稳定性和可持续具有重要意义,而把植物—凋落物—土壤作为一个整体来探讨的研究还有待进一步加强。

黄土丘陵区受温带半干旱气候影响,季节性干旱频发。土壤水分有效性是生态系统过程的关键驱动因素,干旱环境影响植物C、N、P的获取、运输和分配等生理生态过程,从而导致生态系统各组分元素含量发生变化。研究不同水分条件下混交林养分供应差异,可为区域尺度养分循环过程模拟提供基础数据。本试验着重分析了混交造林对生态系统不同组分化学计量特征的影响,因此选取生长季平均值进行分析,未考虑水分条件变化的影响。而后续的分析还需基于生长季水分梯度的观测或者结合降水事件,才能深入理解混交林养分循环过程与机制。

## 4 结论

(1)相比 $P_i$ , $H_iP_i$ 中油松叶片C、N、P含量均显著增加(2.35%,45.59%,25.61%),N:P增加7.11%,C:N和C:P降低(6.29%,12.99%),表明混交造林有助于缓解油松N限制,加快其生长;相比 $R_p$ , $H_iR_p$ 中刺槐叶片C、N含量及C:P和N:P降低(1.45%,1.80%,0.10%,2.79%),P含量及C:N增加(1.97%,2.64%),表明混交造林可增强刺槐对P的吸收,但降低其对C和N的固存。

(2)相比 $P_i$ , $H_iP_i$ 凋落物C、N、P含量及N:P显著增加(28.55%,163.09%,92.86%,39.07%),C:N和C:P显著降低(35.21%,29.87%),表明沙棘与油松混交有助于加快凋落物分解,促进养分归还;相比 $R_p$ , $H_iR_p$ 凋落物C:N和C:P增加(0.62%,46.55%),表明沙棘

与刺槐混交对凋落物分解无显著作用。

(3)相比纯林, $H_rP_t$  和  $H_rR_p$  土壤 C、N、P 含量增加,C : N 和 C : P 降低,表明  $H_rP_t$ 、 $H_rR_p$  均有助于提高土壤 N 和 P 利用效率,改善土壤养分状况。

(4)叶片与凋落物化学计量指标相关性优于其他组分间,且 N、P 相比 C 在不同组分间的相关性更为凸显。

#### 参考文献:

- [1] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [2] 韩恩贤,韩刚,薄颖生.黄土高原沟壑区油松侧柏与沙棘混交的人工林的水文影响[J].林业科学研究,2006,19(6):761-766.
- [3] Forrester D I, Bauhus J, Cowie A L. On the success and failure of mixed-species tree plantations: Lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 209(1/2): 147-155.
- [4] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [5] 黄雅丽,田琪,秦光华,等.黄河三角洲刺槐白蜡混交对土壤细菌群落结构及多样性的影响[J].生态学报,2018,38(11):3859-3867.
- [6] 赵燕波,纪托未,张丹桔,等.3个树种与巨桉混交土壤理化性质、凋落物量和养分含量特征[J].应用与环境生物学报,2015,21(5):948-953.
- [7] 张藤子,李亚楠,韩飞燕,等.辽西两种油松混交林土壤及油松叶片 C : N : P 化学计量特征[J].生态学报,2018,37(10):196-202.
- [8] 张萍,章广琦,赵一娉,等.黄土丘陵区不同森林类型叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(14):5087-5098.
- [9] Elser J J, Dobberfuhl D R. Organism size, life history, and N : P stoichiometry [J]. Bioscience, 1996, 46 (9): 674-684.
- [10] Thomas S C, Martin A R. Carbon content of tree tissues: A synthesis [J]. Forests, 2012, 3(4): 332-352.
- [11] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005, 168 (2): 377-385.
- [12] Wei L L, Lockington D A, Shen Y, et al. Nitrogen sharing and water source partitioning co-occur in estuarine wetlands [J]. Functional Plant Biology, 2015, 42 (4): 410-417.
- [13] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China [J]. Trees, 2007, 21(3): 357-370.
- [14] Li X W, Sun K, Li F Y. Variation in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in the nitrogen-fixing *Hippophae rhamnoides* across northern China [J]. Ecological Research, 2014, 29(4): 723-731.
- [15] 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.
- [16] Fyles J W, Fyles I H. Interaction of Douglas-fir with red alder and salal foliage litter during decomposition [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23: 358-361.
- [17] 张鼎华,翟明普,林平,等.杨树刺槐混交林枯落物分解速率的研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):24-26.
- [18] 杨皓,胡继伟,黄先飞,等.喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J].水土保持研究,2015,22(3):50-55.
- [19] 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.
- [20] 淑敏,王东丽,王凯,等.不同林龄樟子松人工林针叶—凋落叶—土壤生态化学计量特征[J].水土保持学报,2018,32(3):177-182.
- [21] 章广琦,张萍,陈云明,等.黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(4):1328-1336.
- [22] Guo Y P, Yang X, Schob C, et al. Legume shrubs are more nitrogen-homeostatic than non-legume shrubs [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1-10.
- [23] 崔高阳,曹扬,陈云明.陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征[J].植物生态学报,2015,39(12): 1146-1155.
- [24] Xia Z C, Kong C H, Chen L C, et al. A broadleaf species enhances an autotoxic conifers growth through belowground chemical interactions [J]. Ecology, 2016, 97 (9): 2283-2292.
- [25] 邓娇娇,朱文旭,杨立新,等.辽西油松侧柏混交林对土壤微生物群落功能多样性的影响[J].沈阳农业大学学报,2017,48(1):27-34.