

# 陕北黄土丘陵区刺槐人工林土壤生态化学计量特征

刘 愿<sup>1</sup>, 陈云明<sup>1,2</sup>, 梁思琦<sup>1</sup>, 陈 晨<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 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; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 为阐明陕北黄土丘陵区刺槐人工林土壤生态化学计量学特征, 明确不同年限刺槐人工林土壤生态化学计量特征随土层深度的变化规律, 采用野外调查与室内分析相结合的方法对研究区内 9, 17, 30 a 的刺槐人工林土壤 C, N, P, K 含量进行了测定, 分析土壤化学计量特征及土层间的关系。结果表明: (1) 随着刺槐年限的增加, 土壤 C, N 含量增加且二者呈极显著的正相关关系, P 含量先增加后减少, 在生长年限后期需补充土壤 P 元素, K 含量减少; (2) 随土层深度的增加, 土壤 C, N 含量均减少且与土层深度呈显著的负相关关系; P 含量在所有土层中分布较均匀; K 含量随着土层深度的增加而增加, 与土层深度有显著的正相关关系; (3) 土壤 C : N, C : P, C : K, N : P, N : K 和 P : K 均随年限的增加而增加; 在 0—100 cm 土层内, C : N 在 8.52~8.96 之间波动, C : P, C : K, N : P 和 N : K 随土层深度的增加逐渐减少后趋于稳定。研究结果可为黄土丘陵区人工林生态系统养分受限元素判断和平衡调控机制提供依据。

**关键词:** 土壤; 生态化学计量特征; 刺槐人工林; 黄土丘陵区

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0043-07

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2019.04.007

## Soil Ecological Stoichiometry Characteristics of *Robinia pseudoacacia* Plantation in the Loess Hilly Region of Northern Shaanxi Province

LIU Yuan<sup>1</sup>, CHEN Yunming<sup>1,2</sup>, LIANG Siqi<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To understand the characteristics of soil ecological stoichiometry and the relationships between soil depth and soil ecological stoichiometry in *Robinia pseudoacacia* plantation with 9 year, 17 year, 30 year age, respectively, in the loess hilly region, the field investigations and laboratory analyses were carried out to study the soil ecological stoichiometry characteristics and its relationship with soil depth. The results showed that: (1) with the growth of *Robinia pseudoacacia* plantation, the contents of the carbon (C), nitrogen (N) increased and a significant positive correlation between them existed; and the contents of the phosphorus (P) increased first and then decreased, and the soil P elements should be supplemented in the later growth years; The content of potassium (K) decreased with the growth of *Robinia pseudoacacia* plantation; (2) the contents of soil C and N decreased with the increase of soil depth and had a significant negative correlation with soil depth; P content evenly distributed throughout the soil, with little change in soil profile; K content increased with the increase of soil depth, and had a significant positive correlation with soil depth; (3) the soil C : N, C : P, C : K, N : P, N : K, and P : K all showed the increasing trend with the increase of years; in the 0—100 cm soil layer, the soil C : N had a narrow range of 8.52 to 8.96; C : P, C : K, N : P and N : K gradually decreased and then tended to be stable with the increase of soil depth. These results can provide the basis for the judgment of nutrient limiting elements and the balance regulation mechanism of plantation ecosystem in the loess hilly region.

**Keywords:** soil; characteristics of ecological stoichiometry; *Robinia pseudoacacia* plantation; loess hilly region

收稿日期: 2018-10-25

修回日期: 2018-11-27

资助项目: 国家自然科学基金“抚育间伐调控黄土丘陵区刺槐人工林水分养分机理研究”(4177012305)

第一作者: 刘愿(1994—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向: 流域管理与水土保持。E-mail: liuyuanlydia@163.com

通信作者: 陈云明(1967—), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 植被生态与水土保持。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

生态化学计量学是研究生态系统中能量平衡和化学元素平衡的一门学科<sup>[1-2]</sup>,强调有机体主要组成元素碳、氮、磷、钾化学计量特征之间的关系,对植被演变动态、土壤养分循环及其平衡机制起到关键作用<sup>[3-8]</sup>,已被应用到分子、种群、群落以及生态系统等各个方面<sup>[2]</sup>。

土壤是森林生态系统的重要组成部分和化学元素储库,是植物赖以生存的基础。研究人工林土壤的生态化学计量特征,对认识人工林的元素循环过程及实现服务功能的可持续管理均具有重要的理论和实践意义。碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)是土壤重要组成元素,是反映土壤内部元素循环的主要指标及平衡特征的重要参数。淑敏等对科尔沁沙地不同年限樟子松人工林土壤的研究发现,各年限土壤同时受 N、P 养分限制较显著<sup>[9]</sup>。曹娟等对不同年限杉木人工林土壤 C、N、P 含量的研究发现,土壤 C:N 和 C:P 主要受土壤有机碳的影响,如何调控杉木有机碳含量显得十分必要<sup>[10]</sup>。许多研究表明,土壤的 C、N、P 及化学计量随年限增加有明显的动态变化,能够较好地指示植被恢复状况<sup>[11-15]</sup>。目前,对于不同年限刺槐土壤的生态化学计量特征研究仍然不足,尤其是不同元素化学计量比基于年限的变化是否有相似的情况尚不确定。因此,开展不同年限刺槐林下土壤化学计量特征变化的研究则显得尤为重要,以期为探究土壤养分限制、循环和平衡调控机制提供理论依据。

陕北黄土丘陵区水土流失严重,人工造林已成为该地区水土流失治理和生态环境改善的主要途径<sup>[16]</sup>。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)根系发达、生长迅速、耐干旱瘠薄,是黄土丘陵沟壑区水土保持的主要造林树种<sup>[17]</sup>。本研究以陕西省延安市安塞区纸坊沟和县南沟流域不同年限刺槐人工林为研究对象,通过对不同年限刺槐林土壤 C、N、P、K 含量的测定和分析,探讨土壤生态化学计量特征随年限的变化规律,为刺槐人工林的改善抚

育作理论指导,为提高生态系统养分循环和利用效率提供依据,进而对黄土丘陵区植被恢复、土壤养分和营养元素的平衡提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞区水土保持综合试验站纸坊沟流域和县南沟流域,属于黄土丘陵沟壑区第二副区,是延河支流杏子河下游的一级支沟,地理位置在东经 109°13'46"—109°16'3",北纬 36°42'42"—36°46'28",海拔高度为 1 041.5~1 425.7 m,地貌类型属典型黄土丘陵沟壑区,流域内地形破碎,沟壑密度为 8.06 km/km<sup>2</sup>,水土流失严重;气候类型属于温带半干旱季风气候区,年平均气温为 8.8℃,干燥度为 1.5,无霜期为 157~194 d;年平均降水量为 542.5 mm,降水年际年内分布不均,7—9 月降水量占年降水量的 61.1%,且多暴雨;流域内土壤是以黄绵土为主,约占该地区总面积的 95%,抗冲抗蚀能力差;植被分区属于暖温带森林草原过渡带,天然林已遭破坏,主要植物有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2016 年 5 月末在研究区内选择 3 个年限的刺槐人工林地和 1 个撂荒地(CK)为研究对象,其中刺槐人工林分为幼龄林(9 a 生)、中龄林(17 a 生)和近熟林(30 a 生),每个年限选 3 块样地;撂荒地年限为 9 a。选取的各样地立地条件基本一致。样地面积为 20 m×20 m。研究样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本情况

样地	恢复年限/a	海拔/m	坡度/(°)	坡向	坡位	平均胸径/cm	平均树高/m	现存密度/(株·hm <sup>-2</sup> )
1	9	1223.8	28°	EN88°	上坡	4.675	5.004	2475
2	9	1212.0	27.5°	SE165.5°	上坡	5.300	5.332	2450
3	9	1195.7	32°	SW217.5°	中坡	5.603	5.325	2175
4	17	1149.5	36°	SW209°	中坡	6.476	8.600	1225
5	17	1168.8	31°	SW207°	中坡	5.061	7.812	1200
6	17	1174.5	43°	SW197.5°	中坡	6.363	8.792	1275
7	30	1221.3	33°	SE156.5°	上坡	6.619	9.454	1925
8	30	1201.4	35°	SE117.5°	上坡	7.936	9.723	1950
9	30	1169.9	33.5°	SW190.5°	上坡	7.076	9.381	1700
10	CK1	1368.6	37°	SE16.5°	上坡	—	—	—
11	CK2	1373.8	35°	SE15°	上坡	—	—	—

1.2.2 样品采集及测定 于每个年限的3个样方内,在样地对角线上选取6个取样点,用土钻分别取0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm共5个层次的土壤样品,同层分别混合为1个土壤样品。土壤样品经自然风干后,剔除根系等杂物,采用四分法取适量土壤样品,过0.25 mm筛,用于土壤养分的测定。土壤C含量测定采用重铬酸钾—硫酸氧化法测定;土壤N含量测定采用半微量凯氏定氮法;P含量测定用钼锑抗显色法;K含量测定采用火焰光度计法测定<sup>[18]</sup>。

1.2.3 数据处理方法 采用单因素方差分析(ANOVA)检验刺槐不同年限土壤C、N、P、K含量及其比值差异显著性,显著性水平设置为 $p=0.05$ 。先对数据进行方差齐性检验,若方差为齐性,用LSD法进行多重比较;若方差为非齐性,则用Tamhane's T2法进行多重比较。采用Pearson相关分析法对刺槐土壤C、N、P、K含量及其比值进行相关性分析。所有数据运用SPSS 17进行数据处理和Sigmaplot 10.0进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 刺槐人工林土壤C、N、P、K含量的变化规律

2.1.1 土壤C含量 不同年限刺槐人工林土壤和CK样地的土壤C含量呈显著性差异( $p<0.05$ ),不同年限土壤平均C含量均显著低于CK样地,9 a显著低于30 a,17 a分别与9 a,30 a之间差异不显著(表2)。CK样地和3个年限林分的土壤C含量随着土层深度的增加而逐渐减少;同一年限不同土层,3个年限各土层土壤C含量均有显著性差异,9 a土壤C含量表现为0—20 cm土层显著高于20—100 cm土层,17 a土壤C含量表现为0—40 cm土层显著高于40—100 cm土层,30 a土壤C含量表现为0—80 cm土层显著高于80—100 cm土层;不同年限同一土层,除40—60 cm土层土壤C含量在各年限间有显著性差异,其他土层在各年限间均无显著性差异,40—60 cm土层土壤C含量表现为30 a显著高于9 a,但17 a和二者均无显著性差异,在20—40 cm和80—100 cm土层,9 a土壤C含量显著低于CK样地,但17 a,30 a与CK样地无显著性差异(图1)。

2.1.2 土壤N含量 9 a和17 a刺槐人工林与CK样地土壤N含量呈显著性差异( $p<0.05$ ),且二者均显著低于CK样地,30 a林分土壤N含量和CK样地无显著性差异,3个年限之间土壤N含量无显著性差异(表2)。CK样地和3个年限林分土壤N含量随

着土层深度的加深逐渐减少而趋于稳定;同一年限不同土层,3个年限各土层土壤N含量均有显著性差异,9 a土壤N含量表现为0—20 cm土层显著高于20—100 cm土层,17 a土壤N含量表现为0—20 cm土层显著高于40—100 cm土层,30 a土壤N含量表现为0—40 cm土层显著高于60—100 cm土层;不同年限同一土层,除20—40 cm土层土壤N含量在各年限间有显著性差异外,其他土层在各年限间均无显著性差异,在20—40 cm土层土壤N含量表现为30 a和CK样地显著高于9 a和17 a,30 a和CK样地之间无显著性差异,在40—60 cm,80—100 cm土层,3个年限林分土壤N含量均显著低于CK样地(图1)。

表2 不同年限刺槐人工林0—100 cm土层土壤养分含量  
g/kg

年限/a	C	N	P	K
9	2.24±0.32c	0.28±0.04b	0.56±0.01b	20.10±0.71a
17	2.62±0.29bc	0.31±0.02b	0.61±0.03a	19.05±0.76ab
30	2.94±0.24ab	0.33±0.02ab	0.57±0.01ab	17.56±0.68c
CK	3.13±0.28a	0.41±0.07a	0.60±0.01ab	18.42±1.03bc

注:表中数值为平均值±标准误;不同小写字母表示不同年限之间差异显著( $p<0.05$ )。

2.1.3 土壤P含量 9 a和17 a刺槐人工林土壤P含量呈显著性差异( $p<0.05$ ),但二者与30 a及CK样地无显著性差异(表2)。CK样地和3个年限林分土壤P含量随着土层深度的增加变化范围较小;同一年限不同土层,3个年限和CK样地各土层P含量差异不显著;不同年限同一土层,在0—60 cm土层之间,3个年限林分土壤P含量差异不显著,在60—100 cm土层之间,17 a显著高于9 a,但二者与30 a均无显著性差异,在40—80 cm土层之间,CK样地显著高于9 a,但与17 a,30 a无显著性差异(图1)。

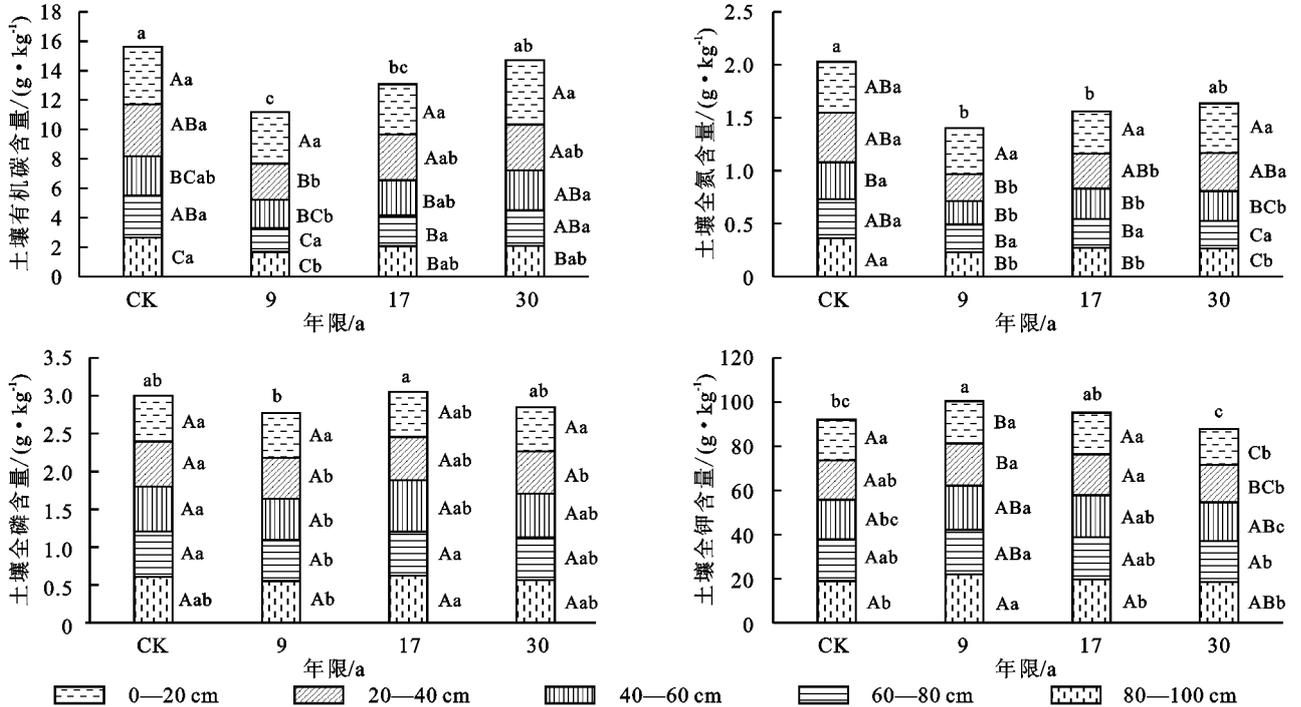
2.1.4 土壤K含量 9 a土壤K含量和17 a差异不显著,二者与30 a差异显著,CK样地显著低于9 a(表2)。3个年限和CK样地刺槐人工林土壤K含量随着土层深度的增加而增加;同一年限不同土层,除17 a各土层K含量无显著性差异,9 a和30 a均有显著性差异,9 a土壤K含量表现为0—40 cm土层显著低于80—100 cm土层,30 a土壤K含量表现为0—20 cm土层显著低于40—100 cm土层;不同年限同一土层,在0—60 cm土层之间,9 a,17 a土壤K含量无显著性差异,二者与30 a有显著性差异,60—80 cm土层表现为9 a和30 a之间有显著性差异,二者与17 a无显著性差异,80—100 cm土层表现为9 a显著高于17 a和30 a,CK样地和17 a在20—80 cm

土层土壤 K 含量均无显著性差异(图 1)。

### 2.2 刺槐人工林土壤生态化学计量比的变化规律

土壤 C : N 的平均值表现为 30 a > 17 a > 9 a > CK, 其中 3 个年限之间差异不显著, 但 30 a 与 CK 样地存在显著性差异 ( $p < 0.05$ )。土壤 C : P 的大小顺序为 CK > 30 a > 17 a > 9 a, 30 a 显著高于 9 a 和 17 a, 9 a 样地的 C : P 值显著低于 CK 样地。土壤 C : K 依次为

CK ≈ 30 a > 17 a > 9 a, 30 a 和 CK 样地差异不显著, 但二者均显著高于 9 a 和 17 a 样地。土壤 N : P, N : K 和 P : K 变化范围较小, 3 个年限之间 N : P 无显著差异, N : K 和 P : K 均为 CK 样地显著高于 9 a 样地。C : N : P 均值由大到小依次为 30 a > 9 a > 17 a > CK, 3 个年限之间无显著差异, CK 样地显著高于 9 a 和 30 a (表 3)。



注: 大写字母表示同一年限不同土层之间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 小写字母表示不同年限同一土层之间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 1 不同年限土壤 C, N, P, K 含量变化

表 3 不同年限刺槐人工林 0—100 cm 土层土壤化学计量比

年限/a	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K	C : N : P
9	8.52 ± 0.44ab	4.19 ± 0.24b	0.12 ± 0.01b	0.51 ± 0.03b	0.01 ± 0.00c	0.03 ± 0.00b	15.53 ± 0.79a
17	8.55 ± 0.37ab	4.39 ± 0.19bc	0.14 ± 0.01b	0.53 ± 0.02b	0.02 ± 0.00c	0.03 ± 0.00a	14.31 ± 0.64ab
30	8.96 ± 0.18a	5.15 ± 0.27a	0.17 ± 0.01a	0.57 ± 0.03ab	0.02 ± 0.00b	0.03 ± 0.00a	15.78 ± 0.34a
CK	7.50 ± 0.23b	5.20 ± 0.22ac	0.17 ± 0.01a	0.70 ± 0.03a	0.02 ± 0.00a	0.03 ± 0.00a	12.55 ± 0.42b

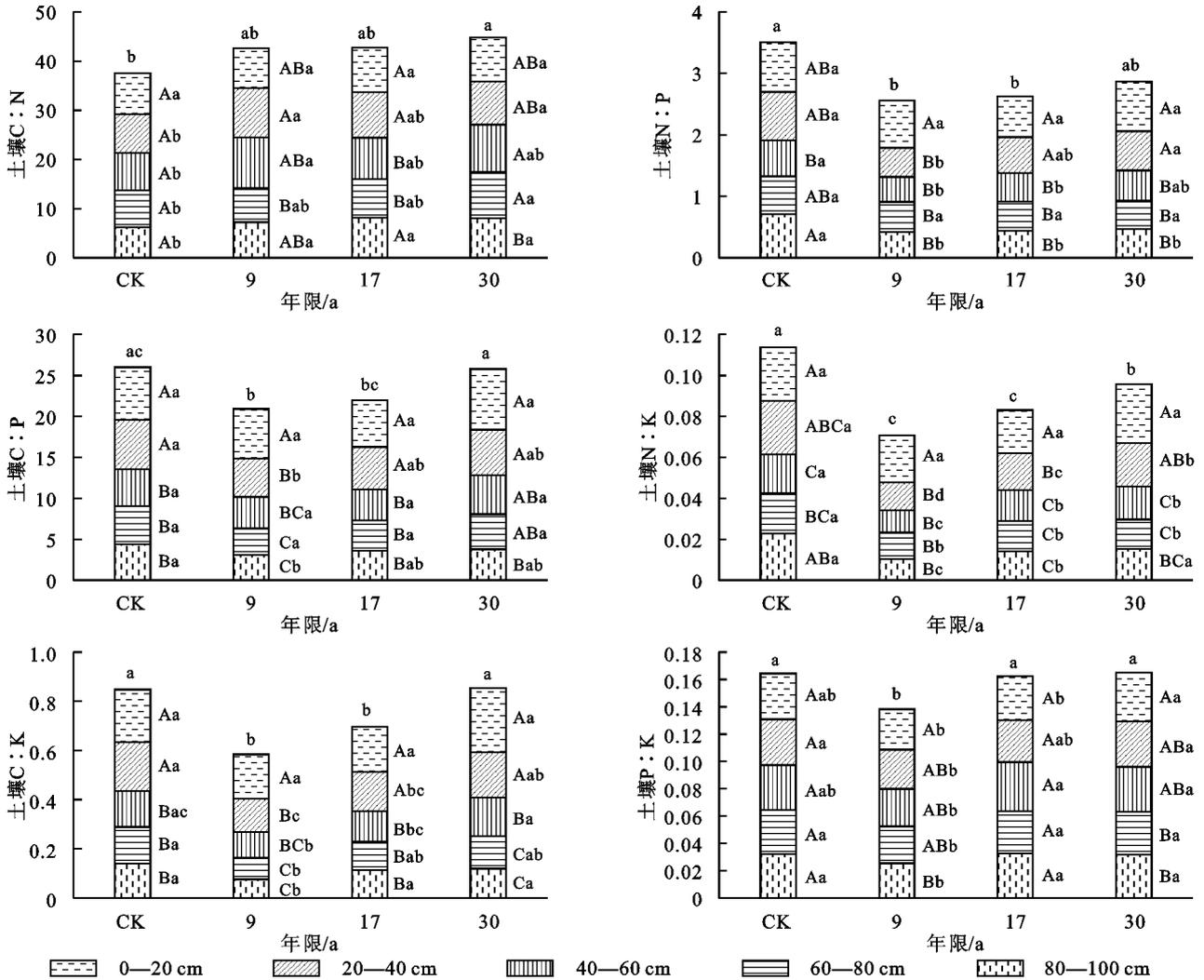
注: 表中数值为平均值 ± 标准误; 不同小写字母表示不同年限之间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

不同年限土壤 C : N 随土层深度的增加出现先增加后减少的趋势, 平均值在 7.50~8.96 之间, 但 CK 样地土壤 C : N 随土层深度的增加而减少; 同一年限不同土层, 3 个年限间均存在显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 9 a 和 17 a 样地土壤 C : N 为 20—40 cm 土层显著高于 60—80 cm 土层, 30 a 样地土壤 C : N 为 40—80 cm 显著高于 80—100 cm 土层; 不同年限同一土层, 3 个年限均表现为差异不显著, 在 20—60 cm 土层, 9 a 和 CK 样地土壤 C : N 差异显著 ( $p < 0.05$ )。土壤 C : P 和 C : K 随土层深度的增加而逐渐减少; 同一年限不同土层, 二者 9 a 土壤均为 0—20 cm 显著高于 20—100 cm 土层, 17 a 和 CK

样地土壤均为 0—40 cm 显著高于 40—100 cm 土层, 30 a 样地土壤均为 0—40 cm 显著高于 80—100 cm 土层; 不同年限同一土层, 不同年限土壤 C : P 均为差异不显著, 在 20—60 cm 土层土壤 C : K 表现为 30 a 和 CK 样地显著高于 9 a 样地, 在 20—100 cm 土层, CK 样地土壤 C : K 显著高于 9 a 样地。土壤 N : P 和 N : K 随土层深度的增加出现先减少后趋于稳定的趋势; 同一年限不同土层, 二者 9 a 样地土壤均为 0—20 cm 显著高于 20—100 cm, 17 a 和 30 a 土壤均为 0—40 cm 显著高于 40—80 cm, CK 样地土壤 N : P 表现为 0—80 cm 土层之间无显著性差异, 而土壤

N : K 为 0—20 cm 显著高于 40—60 cm; 不同年限同一土层, 在 20—60 cm 土层, 土壤 N : P 和 N : K 均为 CK 样地显著高于 9 a, 在 0—20 cm, 60—80 cm 土层, 3 个年限间土壤 N : P 均无显著性差异。土壤 P : K 随土层深度的增加变化范围较小; 同一年限不同土层, 17 a 和 CK 样地土壤 P : K 不同土层之间差

异性不显著, 9 a 土壤表现为 0—20 cm 显著高于 80—100 cm, 30 a 土壤表现为 0—20 cm 显著高于 60—100 cm; 不同年限同一土层, 30 a 土壤 P : K 所有土层均显著高于 9 a, 在 40—100 cm 土层, 17 a 显著高于 9 a, 在 20—100 cm 土层, 17 a, 30 a 和 CK 样地之间均无显著性差异(图 2)。



注: 大写字母表示同一年限不同土层之间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 小写字母表示不同年限同一土层之间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 2 不同年限土壤生态化学计量变化

### 2.3 刺槐人工林土壤生态化学计量及其比值的相关性分析

对 3 个年限刺槐人工林土壤养分含量及其土层深度做相关性分析(表 4), 土壤 C, N 和 K 含量与土层深度有极显著的相关关系, 土壤 C, N 含量与土层深度呈显著负相关, K 含量与土层深度有极显著正相关关系。土壤 P 含量与其他 3 种元素含量均无相关性。

对 3 个年限刺槐人工林土壤养分生态化学计量比与土层深度做相关性分析(表 5), 土壤生态化学计量比均与土层深度表现为极显著负相关关系。C : N 与 C : P, C : K 呈极显著正相关, 与 N : P, N : K 呈极

显著负相关; C : P 与 C : K, N : P, N : K 表现为极显著正相关关系; C : K, N : P 和 N : K 互为极显著正相关。

表 4 不同年限土壤养分含量相关性分析

项目	土层深度	C	N	P	K
土层深度	1				
C	-0.619**	1			
N	-0.512**	0.748**	1		
P	0.007	0.090	0.082	1	
K	0.298**	-0.200**	-0.117	-0.005	1

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 5 不同年限土壤养分生态化学计量比相关性分析

项目	土层深度	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
土层深度	1						
C : N	-0.211**	1					
C : P	-0.627**	0.406**	1				
C : K	-0.638**	0.380**	0.934**	1			
N : P	-0.517**	-0.277**	0.735**	0.666**	1		
N : K	-0.550**	-0.210**	0.725**	0.798**	0.914**	1	
P : K	-0.159**	0.045	0.014	0.325**	-0.060	0.306**	1

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

### 3 讨论

#### 3.1 不同年限土壤有机碳及养分含量

本研究中土壤表层的 C、N 含量均大于底层,这与很多研究观点一致<sup>[19-21]</sup>。土壤 C、N 含量表现为随年限增大逐渐增加的趋势,可能与地表枯落物的累积、植物根系分解产生的 C、N 含量进入土壤有关<sup>[21]</sup>。本研究区的土壤 P 含量平均值(0.58 g/kg)远低于黄土高原中部刺槐林土壤 P 含量平均值(1.12 g/kg)<sup>[12,20]</sup>和全球土壤 P 含量平均值(2.8 g/kg)<sup>[22]</sup>,这是由于土壤中 P 含量易受母质、气候、生物和地球化学过程等一系列因素的影响以及黄土高原地区风化作用和水土流失形成的黄绵土所致,但其接近全国土壤 P 含量平均值(0.56 g/kg)。磷元素是一种沉积性的矿物,土壤中 P 的迁移率很低,在整个土层中分布均匀,不同年限对土壤 P 含量的影响较小。我国土壤中 K 含量一般在 16.6 g/kg 左右<sup>[23]</sup>,本研究中土壤 K 含量是 18.78 g/kg,高于全国平均水平,这是由于 K 元素在自然界以化合物形式存在,K 元素主要来自于土壤母质分化,研究区的位置不同导致土壤 K 含量有所差异。3 个恢复年限土壤 C、N 含量随着土层深度增加而逐渐降低,土壤 P 含量在不同土层上变化不明显,而土壤 K 含量随着土层深度的增加而增加,土壤 C、N、P 和 K 含量在土壤剖面上的分布情况主要是由于 C、N、P、K 元素的来源不同引起的。C、N 主要来自枯落物养分归还和分解,这些元素先在土壤表层积累,再经淋溶作用向下迁移;而 P 和 K 主要来自土壤母质分化。

#### 3.2 不同年限土壤有机碳及养分生态化学计量特征

土壤 C : N 与有机质分解速率成反比,是有机质分解速率的有效指标,也是衡量土壤 C、N 营养平衡状况的指标,影响土壤 C、N 的循环<sup>[24]</sup>。研究表明,中国土壤 C : N 平均值在 10~12 之间<sup>[25]</sup>,本研究中土壤 C : N 平均值为 8.38,低于此平均值,这是由于随着土层深度的增加,土壤有机质逐渐稳定,而大气 N 沉降和有机质矿化作用使土壤 N 含量增加,从而使 C : N 比值降低。本研究中,在 0—100 cm 土层内 C : N 变化范围较小,是因为土壤 C 和 N 在空间分布

上具有一致性<sup>[26]</sup>,因此 C : N 在整个土层空间内比较稳定。随着恢复年限的增加无明显的变化,说明恢复年限对土壤 C : N 的影响较小。

土壤 C : P 反映磷有效性的高低,是衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷元素潜力的一种指标<sup>[27]</sup>。有研究表明,C : P 值低说明微生物在矿化土壤有机质中释放磷的潜力较大;C : P 比值高则说明土壤微生物对土壤有效磷具有同化趋势,出现微生物与作物竞争吸收土壤有效磷的现象,具有较强的固磷潜力<sup>[26]</sup>。本研究中,C : P 远远低于全国平均值(61),说明本研究中刺槐人工林地微生物在矿化土壤有机质中释放 P 的潜力较大,土壤微生物磷对土壤的有效磷库具有补充作用,9 a 和 17 a 的固磷能力低于 30 a 和 CK 样地,说明随着恢复年限的增加土壤固磷能力逐渐增强。

氮是植物生长的必需矿质营养元素,磷是生态系统的限制性元素,土壤 N : P 可以作为衡量氮磷养分元素限制的指标<sup>[24]</sup>。本研究中土壤 N : P 均值大小为 9 a < 17 a < 30 a < CK,不同年限的 N : P 相对恒定,随着年限的增加,土壤中 N 含量增加,P 含量有所下降,土壤 N : P 呈增加趋势。导致这种情况的主要原因是土壤中的 N、P 来源不同。土壤中的 N 的来源途径多样<sup>[28]</sup>,主要源于地表枯落物的归还与大气沉降,而 P 的来源途径相对单一,主要源于岩石风化和淋洗,相较于 N 不易得到补充<sup>[3]</sup>。这也是土壤 N 在表层富集,而 P 在土壤中均匀分布的主要原因<sup>[24]</sup>。随着年限的增加,研究区土壤中 N 的含量增加,说明该地区的刺槐人工林具有良好的固氮作用。土壤中的 N : P 均值说明研究区 P 元素相对缺乏,在植物生长后期影响 N 素的吸收。因此,需对土壤中的 P 元素进行补充,增加人工林对 P 元素的吸收,促进林木生长。

#### 3.3 土壤养分含量及其比值的相关性分析

土壤 C、N 和 K 含量有极显著的相关关系,土壤 C、N 含量与土层深度有显著的负相关关系,C : N 与 C : P、C : K 呈极显著正相关,与 N : P、N : K 呈极显著负相关,表明土壤 C 对土壤养分有良好的指示作用。土壤 C、N 含量和土层深度有显著负相关关系,说明随着土层

深度增加,土壤 C,N 含量减少,这与“表聚现象”具有一致性。土壤 P 含量与土层深度无相关性,表明土壤 P 元素不受土层深度的影响,土壤中的 P 大部分以有机态存在于土壤中。C:K,N:K 和 P:K 互为极显著正相关,表明 C,N,P 元素均对 K 元素有较大影响。

## 4 结论

(1) 随着年限的增加,刺槐人工林土壤 C,N 含量逐渐增加,土壤 P 含量先增加后减少,在生长后期补充 P 元素有助于改善人工林树木的生长情况,土壤 C,N 和 K 含量有极显著的相关关系,土壤 P 含量接近全国平均值,K 含量逐渐减少但高于全国平均值。

(2) 刺槐人工林地土壤 C,N 含量在空间分布上具有一致性,在 0—40 cm 土层含量逐渐减少,40 cm 以下逐渐趋于稳定,表层土壤 C,N 含量明显高于底层。P 和 K 含量在整个空间分布均匀,无明显差异。土壤 C,N 含量与土层深度呈显著负相关,P 含量不受土层深度影响。

(3) 土壤 C:N,C:P,C:K,N:P,N:K 和 P:K 随年限的增加均呈增大的趋势。土壤 C:N 在整个土层中变化范围较小,土壤 C:P,C:K,N:P 和 N:K 在整个土层内逐渐减少后趋于稳定,表层均显著高于底层。C:N 与 C:P,C:K 呈极显著正相关,该研究区土壤 C:N 对土壤有机质分解速率具有指示作用。

### 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] 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.
- [3] 阎恩荣,王希华,郭明,等.天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征[J].植物生态学报,2008,32(1):13-22.
- [4] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry across 753 Terrestrial Plant Species in China[J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.
- [5] 韩文轩,吴漪,汤璐璐,等.北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J].北京大学学报:自然科学版,2009,45(5):855-860.
- [6] 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.
- [7] Yuan Z Y, Chen H Y. A global analysis of fine root production as affected by soil nitrogen and phosphorus[J]. Proceedings Biological Sciences, 2012,279(1743):3796-3802.
- [8] 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.
- [9] 淑敏,姜涛,王东丽,等.科尔沁沙地不同林龄樟子松人工林土壤生态化学计量特征[J].干旱区研究,2018,35(4):789-795.
- [10] 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.
- [11] 陈印平,夏江宝,赵西梅,等.黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征[J].土壤通报,2017,48(2):392-398.
- [12] 任璐璐,张炳学,韩凤朋,等.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.
- [13] 刘珮,马慧,智颖飘,等.9 种典型荒漠植物生态化学计量学特征分析[J].干旱区研究,2018,35(1):207-216.
- [14] 高世铭,杨封科,苏永生.陇中黄土丘陵沟壑区生态环境建设与农业可持续发展研究[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [15] 樊敏,马履一,王瑞辉.刺槐春夏季树干液流变化规律[J].林业科学,2008,44(1):41-45.
- [16] 马露莎,陈亚南,张向茹,等.黄土高原刺槐叶片生态化学计量学特征[J].水土保持研究,2014,21(3):57-61.
- [17] 陈亚南,马露莎,张向茹,等.陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征[J].生态学报,2014,34(15):4412-4422.
- [18] 张向茹,马露莎,陈亚南,等.黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J].土壤学报,2013,50(4):818-825.
- [19] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [20] 贺亮,苏印泉,季志平,等.黄土高原沟壑区刺槐、油松人工林的碳储量及其分布特征研究[J].西北林学院学报,2007,22(4):49-53.
- [21] 刘冰燕,陈云明,曹扬.渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征[J].西北林学院学报,2016,31(1):1-6.
- [22] 杨佳佳,张向茹,马露莎,等.黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J].土壤学报,2014,51(1):133-142.
- [23] Zhang C, Tian H, Liu J, et al. Pools and distributions of soil phosphorus in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005,19, GB1020, doi:10.1029/2004 GB002296.
- [24] 占丽平,李小坤,鲁剑巍,等.土壤钾素运移的影响因素研究进展[J].土壤,2012,44(4):548-553.
- [25] 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.
- [26] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [27] 彭佩钦,张文菊,童成立,等.洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J].应用生态学报,2005,16(10):1872-1878.
- [28] 敖伊敏.不同围封年限下典型草原土壤生态化学计量特征研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2012.