

# 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究\*

杨佳佳<sup>1</sup> 张向茹<sup>1</sup> 马露莎<sup>1</sup> 陈亚南<sup>1</sup> 党廷辉<sup>1,2</sup> 安韶山<sup>1,2†</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨陵 712100)

(2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100)

**摘要** 碳、氮、磷生态化学计量比是生态系统过程和功能的重要特征。刺槐具有生长快、适应性强、耐干旱贫瘠等特点, 是黄土高原区水土保持造林的主要树种, 以黄土高原刺槐林为研究对象, 研究其不同坡向叶片-枯落物-土壤间的碳氮磷生态化学计量学特征, 并对其相关性进行分析。结果表明, 在阴坡和阳坡, C: N 表现为叶片 > 枯落物 > 土壤, C: P, N: P 表现为枯落物 > 叶片 > 土壤; 叶片、枯落物、土壤 C: N、C: P、N: P 在阴坡均无显著性差异 ( $p > 0.05$ ), 但叶片、枯落物、土壤在两两之间均有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。土壤的 C: N、C: P、N: P 均表现为 0~10cm > 10~20cm 层, 但差异性不显著。不论在阴坡或阳坡, 叶片与枯落物的 C: N 均为正相关 ( $p < 0.05$ ); 在阳坡, 叶片与枯落物的 N: P 相关性显著; 在阴坡, 枯落物与 0~10cm 土壤的 C: N 为显著正相关 ( $p < 0.05$ )。

**关键词** 黄土高原; 刺槐; 土壤; 叶片; 枯落物; 生态化学计量学

**中图分类号** S153.1 **文献标识码** A

生态化学计量学 (ecological stoichiometry) 主要是研究生态系统过程中化学元素和能量平衡关系的一门学科, 它强调的是活的有机体及生态系统中主要组成元素碳、氮、磷等元素的相互计量关系<sup>[1]</sup>。生态化学计量学为生态系统过程中土壤-植物的养分供应及组成平衡提供了新的研究思路 and 手段<sup>[2]</sup>, 对认识生态系统内的碳汇潜力具有重要的现实和科学意义<sup>[3]</sup>。

植物生长发育所需的养分主要来源于土壤, 土壤对植物的正常生长发育具有重要的影响<sup>[4]</sup>。植物通过光合作用固定碳, 并且以枯落物的形式将碳和养分逐渐补给给土壤。枯落物及其分解过程是联系植被和土壤的纽带, 它对土壤养分的累积及其植物养分自身的需求和调节<sup>[5]</sup>起着关键的作用, 植物叶片-枯落物-土壤生态系统的养分含量具有明显的时空变化, 这会增强植物叶片-枯落物-土壤碳、氮、磷之间相关关系的复杂性<sup>[6]</sup>。

黄土高原区是治理水土流失和建设生态环境的关键区域, 刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 作为黄土

高原区水土保持造林主要树种之一<sup>[7]</sup>, 具有生长快、适应性强、耐干旱贫瘠等特点。目前黄土高原在植被恢复过程中对人工刺槐林的研究主要集中在水分平衡和养分循环方面<sup>[8-9]</sup>, 对刺槐叶片的化学计量特征也有过报道, 但将刺槐叶片-枯落物-土壤作为一个完整的系统来研究其计量特征还未见报道。研究表明土壤化学计量比特征的变化会影响植被的动态, 对物种的生产力产生影响, 植物的计量特征可以反映土壤养分的供给能力<sup>[10]</sup>。因此本文主要以黄土高原人工刺槐林为研究对象, 运用生态化学计量学的理论与方法, 研究刺槐林下土壤、叶片、枯落物的碳、氮、磷化学计量学特征比的分布特征, 探讨刺槐林下土壤、叶片、枯落物的相互关系, 反映人工刺槐林植被对土壤养分的吸收和影响状况, 以求促进黄土高原的生态恢复建设, 为黄土高原人工刺槐林的合理种植规划提供建设性的理论依据, 也为我国土壤与植物间的生态化学计量学特征关系研究提供基础的理论数据。

\* 国家自然科学基金重点项目 (41030532)、新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-12-0473) 资助

† 通讯作者: 安韶山 (1972—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事植被恢复与土壤质量评价研究。E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 杨佳佳 (1987—), 女, 山西原平人, 硕士研究生, 主要从事土壤化学与土壤生态研究。E-mail: yjj19870124 @ 163.com

收稿日期: 2012-11-28; 收到修改稿日期: 2013-06-07

# 1 材料与方

## 1.1 研究区概况

研究区位于我国黄土高原中部(33°43' ~ 38°48' N, 107°28' ~ 111°15' E), 由南向北包括泾阳县、三原县、淳化县、耀州区、宜君县、黄陵县、洛川县、富县、甘泉县、宝塔区、安塞县、米脂县、榆阳区、神木县(图 1)。区内的北部和西北部属半干旱季风气候类型, 中南部属暖温带半干旱季风气候类型, 年平均气温 8 ~ 9℃, 年降雨量 550 ~ 650mm, 降雨多集中在 7—8 月, 温度和降雨量从东南至西北递减, 具有明显的地域性差异。海拔 800 ~ 1 500 m, 地势西北高、东南低, 北部为风沙和滩地, 地貌为黄土塬梁丘陵沟壑地貌。土壤类型主要为黑垆土、黄绵土等。典型植被为人工林刺槐

(*Robinia pseudoacacia.*)。

## 1.2 样点布设与样品采集

在研究区内选择临近的林相整齐、林木分布均匀、生长坡位相似且平均林龄约 20a 的人工林刺槐作为研究对象, 每个采样点设置阴阳两个坡面作为对照采集点(泾阳县、榆阳区只设置阳坡)。样方设置为 10m × 10m, 每个样方设 3 个重复。为保证每个地区样品的一致性, 样方选择在刺槐生长坡位相近的点。采样点空间分布图如图 1 所示。

样品采集于 2011 年 8 月中旬。土壤的采集是在样方内按照随机均匀分布的原则, 从坡上到坡下采用“S”型路线选择 5 个点进行多点混合, 用土钻分别采集 0 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 两层土样, 分层将 5 个点混合后用塑料袋封好带回实验室, 经自然风干后过 0.149mm 土筛备测; 叶片的采集是在样方内随机选取

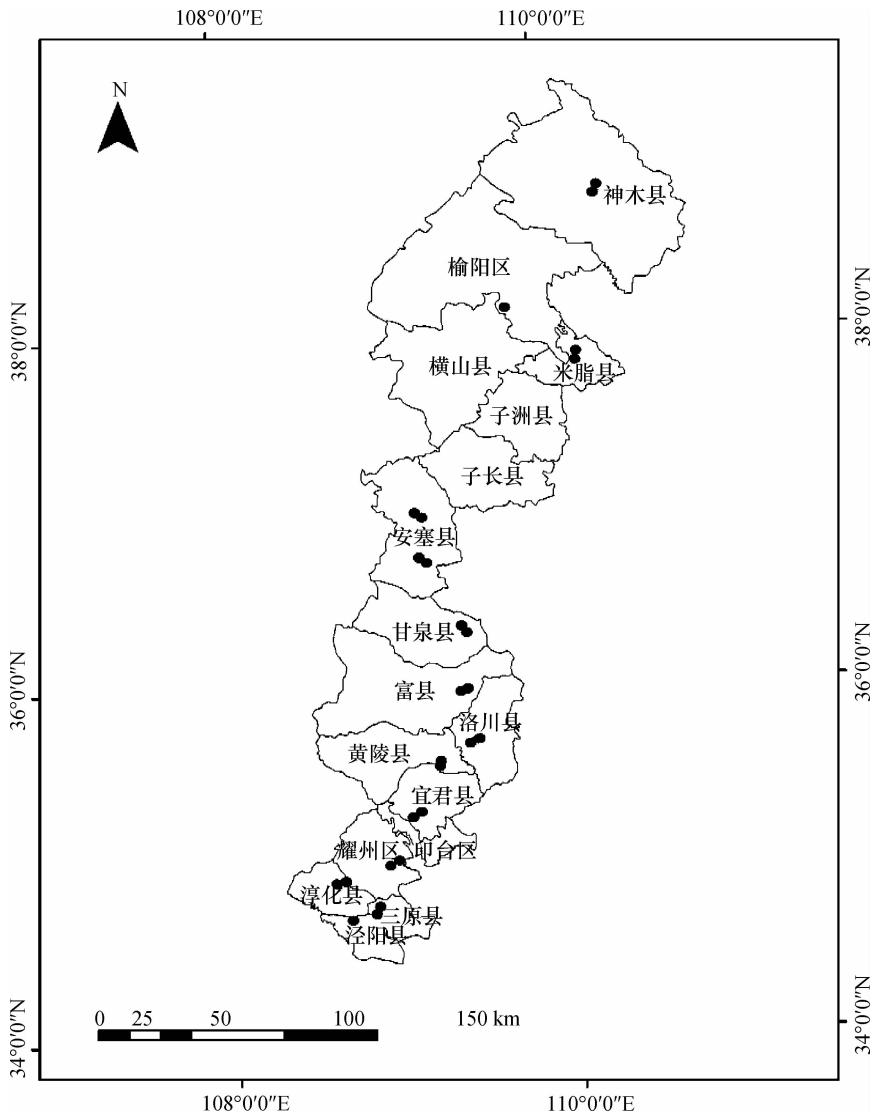


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

长势相近且较好的刺槐,分别设置东、西、南、北四个方向采集每株植物中上部位健康成熟叶片,然后将所采下的叶子混匀后装入牛皮纸袋,带回实验室烘干、粉碎后进行叶片元素的测定;在样方内随机均匀地选择腐熟程度一致(颜色相近)的枯落物进行多点采集,混匀后装入牛皮纸袋,带回实验室烘干、粉碎后测定枯落物中的有机碳、全氮、全磷的含量。

### 1.3 样品测定

土壤、叶片、枯落物中有机碳采用重铬酸钾-外加加热法测定;植物全氮、全磷采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮法,消解后的待测液供全氮、全磷的测定,其中全氮采用凯氏定氮仪测定(KDY-9830, KETUO),全磷采用钒钼黄比色法测定(UV-2450 紫外分光光度计);土壤全氮采用凯氏定氮仪测定(KDY-9830, KETUO),全磷采用高氯酸-硫酸消化-钼锑抗比色法测定(UV-2450 紫外分光光度计)<sup>[11]</sup>。

### 1.4 数据处理

本文土壤、叶片、枯落物的碳、氮、磷比均采用摩尔比。试验数据采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 统计分析软件进行整理。采用 One-Way ANOVA(LSD)对土壤、枯落物、叶片相应的不同坡向碳、

氮、磷含量以及 C:N、C:P、N:P 进行差异性检验,采用 Pearson 相关分析对土壤-枯落物-叶片之间的 C:N、C:P 和 N:P 进行相关性分析。

## 2 结果

### 2.1 刺槐叶片-枯落物-土壤的碳、氮、磷含量总体特征

从表 1 可以看出,刺槐叶片、枯落物的碳、氮、磷含量均表现为碳 > 氮 > 磷 ( $p < 0.01$ )。两层土壤的碳、氮、磷含量均表现为碳 > 磷 > 氮 ( $p < 0.01$ )。叶片、枯落物的碳、氮、磷含量均显著大于土壤,且叶片的碳、氮、磷含量均显著大于枯落物。在阳坡,叶片、枯落物、土壤间的碳、氮含量均存在显著性差异 ( $p < 0.05$ ),枯落物和土壤的磷含量无显著性差异 ( $p > 0.05$ );在阴坡,叶片、枯落物、土壤间的碳、磷含量均存在显著性差异 ( $p < 0.05$ ),叶片与枯落物的氮含量无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),但叶片和枯落物的氮含量与土壤 0~10cm 及 10~20cm 间的氮含量均存在显著性差异 ( $p < 0.05$ )。叶片、枯落物、土壤的碳、氮、磷含量在不同坡向均无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

表 1 叶片-枯落物-土壤的碳、氮、磷含量特征

Table 1 C, N and P contents in leaf, litter and soil

类型 Type	坡向 Slope aspect	样品数量 Number of samples	碳 C(g kg <sup>-1</sup> )	氮 N(g kg <sup>-1</sup> )	磷 P(g kg <sup>-1</sup> )
叶片 Leaf	阳坡 Sunny slope	84	453.7 ± 17.01a	21.56 ± 3.52a	2.17 ± 0.44a
	阴坡 Shady slope	72	454.8 ± 19.52a	21.16 ± 2.37a	1.99 ± 0.34a
枯落物 Litter	阳坡 Sunny slope	84	366.9 ± 40.97b	19.23 ± 3.95b	1.35 ± 0.36b
	阴坡 Shady slope	72	373.5 ± 33.36b	18.90 ± 3.59a	1.51 ± 0.50b
土壤 0~10cm Soil 0~10cm	阳坡 Sunny slope	84	10.20 ± 6.49c	0.92 ± 0.59c	1.14 ± 0.26b
	阴坡 Shady slope	72	9.62 ± 4.18c	0.93 ± 0.45b	1.19 ± 0.25c
土壤 10~20cm Soil 10~20cm	阳坡 Sunny slope	84	5.95 ± 3.08c	0.57 ± 0.29c	1.06 ± 0.28b
	阴坡 Shady slope	72	6.01 ± 2.13c	0.62 ± 0.29b	1.10 ± 0.26c

注:同列不同字母表示阳坡(阴坡)叶片、枯落物、不同层次土壤间碳、氮、磷含量的差异性显著( $p < 0.05$ ) Note: The different letters in the same column mean significance (at 5% level) in difference between leaf, litter and soil in C,N,P content on sunny or shady slope.

### 2.2 不同坡向刺槐叶片-枯落物-土壤生态化学计量比总体特征

2.2.1 不同坡向叶片 C:N、C:P、N:P 的变化特征  
从表 2 中得出,阳坡叶片 C:N 的摩尔比值范围为 18.78 ~ 28.91, C:P 为 373.33 ~ 746.95, N:P 为

15.46 ~ 32.56;阴坡叶片 C:N 的摩尔比值范围为 20.51 ~ 28.08, C:P 为 436.03 ~ 823.87, N:P 为 19.25 ~ 36.00。从平均摩尔比值看,叶片在不同坡向的 C:N、C:P、N:P 表现为阴坡 > 阳坡,坡向的差异性不显著( $p > 0.05$ )。

表 2 不同坡向叶片 C:N、C:P、N:P 的变化特征  
Table 2 Stoichiometry of C、N、P in leaf as affected by slope aspect

研究区 Study area	阳坡 Sunny slope			阴坡 Shady slope		
	C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P
泾阳县 Jingyang County	27.40	677.1	24.71			
三原县 Sanyuan County	27.92	709.8	25.42	28.04	569.6	20.31
淳化县 Chunhua County	25.10	467.4	18.62	28.05	540.1	19.25
耀州区 Yaozhou District	27.05	603.8	22.32	27.76	740.2	26.67
宜君县 Yijun County	26.28	406.4	15.46	21.98	500.1	22.75
黄陵县 Huangling County	20.03	538.3	26.87	24.97	742.3	29.73
洛川县 Luochuan County	26.47	496.2	18.74	27.54	605.0	21.96
富县 Fuxian County	19.67	632.4	32.15	22.88	823.9	36.00
甘泉县 Ganquan County	28.27	626.0	22.14	25.17	608.8	24.19
宝塔区 Baota District	28.91	620.9	21.48	28.08	577.9	20.58
安塞县 Ansai County	24.58	538.2	21.90	26.89	677.3	25.19
米脂县 Mizhi County	28.05	441.2	15.73	21.71	436.0	20.09
榆阳区 Yuyang District	22.94	747.0	32.56			
神木县 Shenmu County	18.78	373.3	19.88	20.51	458.6	22.36
平均值 Mean	25.10 ± 3.44	562.7 ± 115.2	22.71 ± 5.26	25.30 ± 2.85	606.7 ± 119.6	24.09 ± 4.83

**2.2.2 不同坡向枯落物 C:N、C:P、N:P 的变化特征** 从表 3 中得知,在阳坡,枯落物的 C:N 的摩尔比范围为 16.21 ~ 28.12, C:P 为 473.40 ~ 988.75, N:P 为 21.86 ~ 54.37; 在阴坡, C:N 的摩尔比范围为 19.44 ~ 30.54, C:P 为 427.41 ~ 990.59, N:P 为 20.24 ~ 48.50。从平均摩尔比值看,枯落物 C:N 摩尔比值阴坡略大于阳坡, C:P、N:P 摩尔比值阳坡略大于阴坡。枯落物在阴坡和阳坡的碳、氮、磷比差异性不显著 ( $p > 0.05$ )。

**2.2.3 不同坡向不同层次间土壤 C:N、C:P、N:P 的变化特征** 从表 4 中得知,在阳坡, 0 ~ 10cm 层土壤的 C:N 的摩尔比为 9.48 ~ 15.56, C:P 为 8.93 ~ 53.21, N:P 为 0.77 ~ 5.11; 10 ~ 20cm 层 C:N 的摩尔比为 9.13 ~ 13.72, C:P 为 7.85 ~ 41.80, N:P 为 0.44 ~ 3.19。在阴坡, 0 ~ 10cm 层土壤的 C:N 的摩尔比为 8.58 ~ 16.27, C:P 为 9.46 ~ 47.71, N:P 为 0.76 ~ 3.63; 10 ~ 20cm 层 C:N 的摩尔比为 6.18 ~ 13.41, C:P 为 5.99 ~ 33.41, N:P 为 0.54 ~ 3.56。从摩尔比平均值看,土壤 C:N、C:P 比阳坡 > 阴坡, N:P 比阴坡 > 阳坡, 但不同坡向的差异性不显

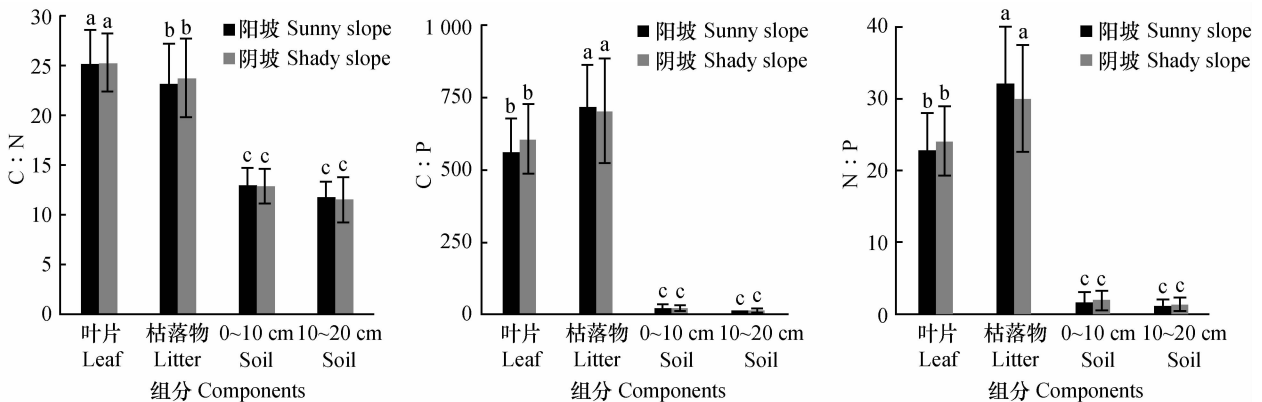
著 ( $p > 0.05$ )。土壤层次 0 ~ 10cm 层的碳、氮、磷比均大于 10 ~ 20cm 层, 不同土层间差异不显著 ( $p > 0.05$ )。

### 2.3 刺槐叶片-枯落物-土壤 C:N、C:P 和 N:P 的关系特征

从图 2 可以看出,在阴坡和阳坡, C:N 比均表现为叶片 > 枯落物 > 土壤, C:P、N:P 比的趋势均表现为枯落物 > 叶片 > 土壤。具体而言,叶片、枯落物的碳、氮、磷比与土壤 0 ~ 10cm、10 ~ 20cm 层均有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。在阴坡和阳坡,叶片和土壤碳、氮、磷比均表现为 C:P > C:N > N:P ( $p < 0.05$ ), 枯落物碳、氮、磷比均表现为 C:P > N:P > C:N ( $p < 0.05$ )。土壤 0 ~ 10cm、10 ~ 20cm 层的 C:N、C:P 比均表现为阳坡 > 阴坡, N:P 比表现为阴坡 > 阳坡。叶片、枯落物、土壤的碳、氮、磷比在阴阳坡均无显著差异性 ( $p > 0.05$ ); 叶片、枯落物、土壤在两两之间的碳、氮、磷比均有显著差异性 ( $p < 0.05$ )。土壤不同层次的 C:N、C:P、N:P 表现为 0 ~ 10cm > 10 ~ 20cm, 但差异不显著 ( $p > 0.05$ )。

表 3 不同坡向枯落物 C:N、C:P、N:P 的变化特征  
Table 3 Stoichiometry of C、N、P in litter as affected by slope aspect

研究区 Study area	阳坡 Sunny slope			阴坡 Shady slope		
	C: N	C: P	N: P	C: N	C: P	N: P
泾阳县 Jingyang County	27.62	827.3	30.00			
三原县 Sanyuan County	23.91	573.5	23.89	21.15	427.4	20.24
淳化县 Chunhua County	21.27	713.3	33.64	21.57	647.2	30.26
耀州区 Yaozhou District	23.36	473.4	21.86	24.90	539.0	21.21
宜君县 Yijun County	27.00	882.3	32.65	29.97	956.2	32.86
黄陵县 Huangling County	17.62	726.0	41.43	19.44	518.3	26.82
洛川县 Luochuan County	20.75	644.7	31.18	20.23	753.8	37.10
富县 Fuxian County	16.21	880.6	54.37	20.43	990.6	48.50
甘泉县 Ganquan County	18.19	517.5	28.51	19.71	521.1	26.93
宝塔区 Baota District	21.08	661.1	31.90	24.20	715.8	29.61
安塞县 Ansai County	24.85	652.2	26.52	27.21	807.0	29.76
米脂县 Mizhi County	28.12	988.8	35.06	25.59	727.6	28.73
榆阳区 Yuyang District	27.94	762.0	27.36			
神木县 Shenmu County	25.74	750.8	30.44	30.54	835.0	27.27
平均值 Mean	23.12 ± 4.01	718.1 ± 145.6	32.06 ± 8.04	23.75 ± 3.95	703.3 ± 178.8	29.94 ± 7.40



注:不同小写字母表示阳坡(阴坡)叶片、枯落物、不同层次土壤间 C:N、C:P、N:P 的差异性显著 ( $p < 0.05$ )。Note: The different letters in the same column mean significance ( $p < 0.05$ ) in difference between leaf, litter and soil in C:N, C:P and N:P on sunny(shady)slope

图 2 叶片-枯落物-土壤 C:N、C:P、N:P

Fig. 2 C: N, C: P and N: P in leaf, litter and soil

### 2.4 刺槐叶片-枯落物-土壤的 C:N、C:P 和 N:P 的相关性

本研究对阴坡、阳坡的叶片-枯落物-不同层次土壤间 C:N、C:P、N:P 两两进行了 Pearson 的相关性分析,表 5 列出了满足  $p < 0.05$  的相关关系,可以看出在阴坡和阳坡,两层土壤间的 C:N、C:P、N:P

均为极显著相关,叶片与枯落物的 C:N 均为显著的正相关。在阳坡,叶片与枯落物的 C:P、N:P 为显著相关,两层土壤与叶片和枯落物的碳、氮、磷比相关性均不显著。在阴坡,叶片与枯落物的 C:P、N:P 无显著相关性,枯落物与 0~10cm 土壤的 C:N 为显著正相关,与土壤层次间 C:P、N:P 相关性不显著。

表 4 不同坡向土壤的碳、氮、磷化学计量变化特征  
 Table 4 Stoichiometry of C、N、P in soil as affected by slope aspect

研究区 Study area	阳坡 0 ~ 10cm Sunny slope 0 ~ 10cm			阳坡 10 ~ 20cm Sunny slope 10 ~ 20cm		
	C: N	C: P	N: P	C: N	C: P	N: P
	泾阳县 Jingyang County	11.65	16.83	1.45	9.34	10.92
三原县 Sanyuan County	13.43	53.21	5.11	13.09	41.80	3.19
淳化县 Chunhua County	12.67	34.48	3.80	11.98	25.30	2.12
耀州区 Yanzhou District	13.51	27.92	2.06	11.90	17.36	1.46
宜君县 Yijun County	12.86	39.27	3.07	11.46	13.59	1.21
黄陵县 Huangling County	15.33	11.85	0.77	13.48	10.58	0.59
洛川县 Luochuan County	11.48	24.84	2.06	10.83	26.45	2.41
富县 Fuxian County	12.19	15.14	1.21	12.09	12.27	0.97
甘泉县 Ganquan County	12.07	17.66	1.46	9.13	8.44	1.04
宝塔区 Baota District	13.68	12.61	0.94	13.30	8.27	0.63
安塞县 Ansai County	9.48	8.93	0.93	10.09	10.64	1.04
米脂县 Mizhi County	14.17	11.76	0.86	13.57	8.34	0.44
榆阳区 Yuyang District	15.56	13.51	0.77	11.62	7.85	0.78
神木县 Shenmu County	14.38	20.63	1.46	13.72	16.08	1.20
平均值 Mean	13.03 ± 1.62	22.05 ± 12.72	1.85 ± 1.31	11.83 ± 1.54	15.56 ± 9.64	1.30 ± 0.78

研究区 Study area	阴坡 0 ~ 10cm Shady slope 0 ~ 10cm			阴坡 10 ~ 20cm Shady slope 10 ~ 20cm		
	C: N	C: P	N: P	C: N	C: P	N: P
	三原县 Sanyuan County	8.58	20.48	2.40	7.60	14.87
淳化县 Chunhua County	12.95	47.71	3.63	12.57	33.41	2.65
耀州区 Yaozhou County	13.49	37.21	2.77	12.23	18.61	1.52
宜君县 Yijun County	13.25	31.54	2.53	12.25	16.29	1.42
黄陵县 Hunagling County	12.85	14.94	1.16	12.75	11.37	0.80
洛川县 Luochuan County	11.48	19.88	1.52	11.45	22.87	2.04
富县 Fuxian County	13.75	20.35	1.48	12.77	9.77	0.76
甘泉县 Ganquan District	13.22	13.04	1.02	13.22	10.81	0.84
宝塔区 Baota District	13.39	13.14	0.99	13.41	9.74	0.73
安塞县 Ansai County	12.15	13.14	1.09	12.12	9.89	0.82
米脂县 Mizhi County	13.16	9.46	0.76	11.94	5.99	0.54
神木县 Shenmu County	16.27	12.45	5.32	6.18	21.78	3.56
平均值 Mean	12.88 ± 1.76	21.11 ± 11.75	2.06 ± 1.36	11.54 ± 2.26	15.45 ± 7.70	1.47 ± 0.93

表 5 叶片-枯落物-不同层次土壤间的 C:N、C:P、N:P 的相关性

Table 5 Relationships in C:N, C:P and N:P between leaf, litter and soil

阳坡 Sunny slope		相关系数 Correlation coefficient	阴坡 Shady slope		相关系数 Correlation coefficient
C:N	叶片与枯落物 Leaf and litter	0.555 *	C:N	叶片与枯落物 Leaf and litter	0.600 *
	两层土壤间 Soil layers	0.701 **		枯落物与上层土壤 Litter and the topsoil	0.589 *
C:P	叶片与枯落物 Leaf and litter	0.660 *	C:P	两层土壤间 Soil layers	0.771 **
	两层土壤间 Soil layers	0.880 **		两层土壤间 Soil layers	0.744 **
N:P	叶片与枯落物 Leaf and litter	0.550 *	N:P	两层土壤间 Soil layers	0.856 **
	两层土壤间 Soil layers	0.926 **			

注: \* 表示  $p < 0.05$ , \*\* 表示  $p < 0.01$  Note: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

### 3 讨论

#### 3.1 土壤和植物的碳、氮、磷含量特征

土壤和植物是整个陆地生态系统中相互作用的 2 个子系统,植物生长所需的营养元素主要来源于土壤,其中碳、氮、磷元素是影响植物生长发育所必需的营养,在植物生长发育以及行为过程中均发挥着重要的作用<sup>[12]</sup>。本研究中,无论阴坡或阳坡,刺槐碳、氮、磷含量均表现为叶片 > 枯落物 > 土壤。刺槐叶片氮、磷含量略高于全球植物叶片氮 ( $20.6 \text{ mg g}^{-1}$ ) 与磷 ( $2.0 \text{ mg g}^{-1}$ ) 的平均含量<sup>[2]</sup>,也略高于我国植物叶片氮 ( $20.2 \text{ mg g}^{-1}$ )<sup>[13]</sup>与磷 ( $1.5 \text{ mg g}^{-1}$ )<sup>[14]</sup>的平均含量。这说明黄土高原地区刺槐植物体内的氮含量丰富,这与上官周平<sup>[15]</sup>对黄土高原叶片养分组成的研究结果较为一致。同时,叶片碳平均含量与上官周平对黄土高原刺槐叶片碳平均含量 ( $451.8 \text{ mg g}^{-1}$ )<sup>[22]</sup>的研究较为一致,但低于全球植物叶片碳的平均含量 ( $464 \text{ mg g}^{-1}$ )<sup>[2]</sup>。这说明黄土高原区刺槐叶片的有机化合物含量较低,这与单一物种以及黄土高原特殊的地理环境及气候条件有一定的关系。

本研究的黄土高原区土壤磷平均含量明显低于全球平均水平 ( $2.8 \text{ mg g}^{-1}$ )<sup>[16]</sup>,这与地表土壤对磷的吸附作用、黄土高原地区强烈的风化作用和水土流失作用有关,亦与中国土壤磷含量普遍低于全

球平均水平的规律一致<sup>[16]</sup>。土壤中磷迁移速率很低,因此在阴坡和阳坡磷的差异性不显著。土壤表层 0~10cm 的碳、氮含量明显大于 10~20cm 土层,并且阴坡 > 阳坡,这是由于刺槐受坡向的影响<sup>[17]</sup>,土壤水分状况的差异较大,研究表明<sup>[18]</sup>,土壤有机碳与土壤含水量之间呈极显著正相关,地上植被和根系生物量会随着土壤含水量的增加而增多,另外一方面枯落物和根系的分解速率也随着土壤含水量的增加而增快,因此土壤有机质和全氮含量整体上阳坡低于阴坡,在本研究中,坡向的影响并不显著,这与连纲等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。黄土高原人工刺槐林在恢复过程中,作为落叶阔叶树,受土壤水分含量的影响,在阳坡生长缓慢,枯落物层厚度、分解速率、水分条件的影响以及人为的干扰均会导致土壤的养分条件发生变化,从而影响土壤养分元素的积累。

#### 3.2 叶片、枯落物、土壤碳、氮、磷化学计量学特征关系

叶片、枯落物、土壤对环境变化的反应比较敏感,它们是生态系统中生物因子与环境因子的代表<sup>[20]</sup>,它们的碳、氮、磷比存在差异,由土壤与植物各自执行不同的功能决定的。植物叶片、枯落物和土壤碳、氮、磷比可以作为养分限制以及碳、氮、磷饱和诊断和有效的预测性指标,其中 N:P 是植物生长养分限制的敏感性指数<sup>[21]</sup>。在本研究中,阳坡和阴坡,叶片 C:N 高于全球平均水平的 22.5<sup>[2]</sup>,N:P

明显高于全国的平均水平 15.2<sup>[13]</sup>, C:P 明显高于黄土高原平均水平 312<sup>[13]</sup>。这可能与黄土高原的气候条件,水热状况有关,黄土高原在植被恢复和群落演替的过程中,植被种类增多,物种多样性增加,土壤养分的富集作用增强,植物可吸收利用的养分增加所导致。研究表明<sup>[20]</sup>,植物叶片 N:P > 16,是受磷元素限制,这是由于黄土高原土壤磷含量较低,植物受磷的限制作用大于氮,这也与刺槐是固氮植物有关。

在阴坡和阳坡,叶片的 C:P 和 N:P 比均低于枯落物,而叶片 C:N 比高于枯落物,这可能由于枯落物是在刺槐的生长发育后期,叶片生长速度减慢并开始衰老枯黄凋落,植物体内磷元素发生迁移,导致枯落物中磷含量较低,最终形成较高的 C:P 和 N:P;研究表明<sup>[22]</sup>,枯落物的 N:P > 25,表明凋落物的分解较慢,有利于养分的存储,因此,在黄土高原区刺槐枯落物可减缓水土流失,涵养土壤,说明刺槐是优良的水土保持树种。也有研究表明刺槐枯落物对碳、氮、磷释放率的影响均表现为促进作用<sup>[23]</sup>。枯落物碳、氮、磷生态化学计量比均表现为 C:P > N:P > C:N,说明黄土高原地区植物氮含量偏高,磷含量偏低。有研究表明<sup>[24]</sup>,刺槐在生长过程中主要受磷的限制,在生长后期受氮亏损的影响,原因是刺槐是豆科植物,与刺槐特有的氮素吸收机制有某种关系。也有研究表明<sup>[25]</sup>,C:N 和 C:P 比除了与不同植物和土壤中养分含量的大小有关之外,也与植物的生长发育变化有一定的关系。

与全球不同生态系统土壤的平均水平(C:N:P = 186:13:1)相比<sup>[26]</sup>,黄土高原地区土壤的 C:N、C:P、N:P 比较低。研究表明,中国土壤 C:N 比平均值在 10:1 ~ 12:1 之间<sup>[27]</sup>,与本研究黄土高原土壤的 C:N 比结果较为一致。本研究表明,土壤的 C:N、C:P、N:P 比值均低于叶片和枯落物。在自然森林生态系统中,土壤中的营养元素主要是来自枯落物和根系分泌物,同时枯落物的质量、数量以及分解速率是森林生态系统对土壤养分含量变化以及实现养分循环的重要因素<sup>[20]</sup>,但若想探究土壤有机质分解过程和凋落物分解过程中的养分迁移转化问题,还需要进一步分析不同季节下叶片、枯落物、土壤的化学计量特征。黄土高原地区由于特定的地形及气候条件,土壤养分本身比较贫瘠,水土流失严重,加上人为扰动等多种环境因子的共同作用,使得土壤中营养元素的化学计量比较低。土壤和植物表现出不同的化学计量比特征,这与植物的

选择性吸收有一定关系<sup>[12]</sup>,植物根据自己本身所需的营养元素来选择性的吸收土壤中的碳、氮、磷等元素,而这种计量关系特征还需要进行深入地研究和探讨。

无论是在阴坡或阳坡,叶片、枯落物的 C:N 均有显著相关性,而 C:P、N:P 仅仅在阴坡的枯落物和叶片之间具有显著相关性,说明刺槐在阴坡对养分的吸收利用优于阳坡,阴坡土壤蒸发强度小,水分散失的少,而枯落物直接来源于叶片,且腐解程度不高,导致叶片与枯落物有较好的相关性。阴坡的土壤 C:N 与枯落物的相关性显著,阳坡不显著,可以说明在水分条件的制约下,阴坡土壤的碳、氮来源很大程度上来源于枯落物,而阳坡土壤的碳、氮仅仅部分来源于刺槐枯落物,刺槐在阳坡占植被的优势程度低于阴坡。很多研究表明<sup>[28]</sup>,刺槐在不同坡向生长状况有差异,主要原因是坡向不同,会导致它所接受的太阳辐射量不同,土壤水分状况、温度以及植被状况等环境因子也有一定的差异,而这些因子尤其是土壤水分状况是影响刺槐生长的重要因素,但本研究中坡向对其影响不显著。

### 3.3 C:N 和 C:P 的化学计量比与全球碳循环的关系

碳是大气和温室气体的主要组成元素,特别是自然森林生态系统具有碳的“源”与“汇”的双重功能而倍受关注<sup>[29]</sup>。C:N 和 C:P 比代表植物同化碳的能力和植物固碳效率的高低,即碳的累积速率和存储能力<sup>[24]</sup>。但目前对土壤和植物中碳与养分比值的差异与生态系统功能之间的关系认识还不十分清楚。因此,了解 C:N、C:P 化学计量比,在预测和调控森林及草原生态系统中的养分循环以及生态环境影响具有重要性,而对森林生态系统中叶片、枯落物和土壤中的碳、氮、磷元素的生态化学计量比进行分析,探讨植物叶片-枯落物-土壤的相互作用和生态化学计量关系特征,进一步从生态化学计量特征的角度上掌握碳循环的调控机制,对于促进生态化学计量学理论的发展提供新的科学依据,也可为减缓温室效应提供新的研究思路。

## 4 结 论

人工刺槐林不同坡向叶片、枯落物的碳、氮、磷含量均显著大于土壤,且叶片的碳、氮、磷含量均显著大于枯落物,但不同坡向的差异性均不显著。在阴、阳坡,C:N 表现为叶片 > 枯落物 > 土壤,C:P、



N:P 表现为: 枯落物 > 叶片 > 土壤。叶片、枯落物、土壤碳、氮、磷比在两两之间均有显著的差异性 ( $p < 0.05$ ), 但不同坡向和土层间差异不显著。在阴坡和阳坡三者之间的相关分析也表明, 叶片与枯落物的 C:N 比均为正相关, 两层土壤间的 C:N、C:P、N:P 均为极显著相关。在阳坡, 植物叶片与枯落物的 N:P 相关性也显著。在阴坡, 枯落物与 0 ~ 10 cm 土壤的 C:N 为显著相关。

## 参考文献

- [1] 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. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2—6. He J S, Han X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems (In Chinese). Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2—6
- [2] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578—580
- [3] 邵梅香, 覃林, 谭玲. 我国生态化学计量学研究综述. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6918—6920. Shao M X, Tan L, Tan L. Review of researches on ecological stoichiometry in China (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 6918—6920
- [4] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7119—7123. Wang W Q, Xu L L, Zeng C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7119—7123
- [5] Agren G I, Bosatta E. Theoretical ecosystem ecology—understanding element cycles. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 234—234
- [6] Ladanai S, Agren G I, Olsson B A. Relationships between tree and soil properties in *Piceabies* and *Pinussylvestris* forests in Sweden. Ecosystems, 2010, 13(2): 302—316
- [7] 张士奇, 王国栋, 田鹏, 等. 黄土高原刺槐林地土壤微生物的分布特征. 水土保持学报, 2004, 18(6): 128—129. Zhang S Q, Wang G D, Tian P, et al. Distributive feature of soil microorganism of *Robinia pseudoacacia* L. plantation forestland in Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 128—129
- [8] 刘增文, 李雅素, 吕月玲, 等. 刺槐主要养分内循环及外循环研究. 南京林业大学学报, 1997, 21(4): 6—10. Liu Z W, Li Y S, Lü Y L, et al. Study on the internal and external nutrient cyclings of blacklocust (In Chinese). Journal of Nanjing Forestry University, 1997, 21(4): 6—10
- [9] 魏天兴, 朱金兆. 黄土区人工林地水分供耗特点与林分生产力研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(4): 45—51. Wei T X, Zhu J Z. Feature of water supply and consumption and productivity of stand in Loess region (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999(4): 45—51
- [10] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3938—3944. Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus element (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3938—3944
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 45—52. Bao S D. Soil and Agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 45—52
- [12] 马永跃, 王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的 C、N、P 含量及其生态化学计量比. 亚热带农业研究, 2011, 7(3): 182—187. Ma Y Y, Wang W Q. Carbon, nitrogen and phosphorus content and the ecological stoichiometric ratios of paddy field soil-plants in Minjiang River estuary (In Chinese). Subtropical Agriculture Research, 2011, 7(3): 182—187
- [13] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377—385
- [14] 陈步峰, 吴统贵, 肖以华, 等. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. 植物生态学报, 2010, 34(1): 58—63. Chen B F, Wu T G, Xiao Y H, et al. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China (In Chinese). Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 58—63
- [15] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965—973. Zheng S X, Shangguan Z P. Space distribution pattern of plant leaf nutrient composition in Loess Plateau (In Chinese). Progress of Natural Science, 2006, 16(8): 965—973
- [16] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 1—9. Ren S J, Yu G R, Tao B, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC (In Chinese). Environmental Science, 2007, 28(12): 1—9
- [17] 焦醒, 刘广全. 黄土高原刺槐生长状况及其影响因子. 国际沙棘研究与开发, 2009, 6(2): 42—47. Jiao X, Liu G Q. Growth and its influencing factors of locust in the Loess Plateau (In Chinese). International Seabuckthorn Research and Development, 2009, 6(2): 42—47
- [18] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. 土壤学报, 2012, 49(1): 68—76. Liu W, Cheng J M, Gao Y, et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 68—76
- [19] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测——以陕西省横山县为例. 土壤学报, 2008, 45(4): 577—584. Lian G, Guo X D, Fu B J, et al. Spatial variability and prediction of soil nutrients on a county scale on the Loess Plateau: A case study of Hengshan County, Shaanxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(4): 577—584
- [20] 刘兴沼, 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. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64—71. Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in Southern China (In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2010, 34(1): 64—71
- [21] Hobbie S E, Gough L. Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska. Oecologia, 2002, 131: 453—462
- [22] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(2): 335—343. Pan F J, Zhang W, Wang K L, et al. Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2): 335—343
- [23] 祝振华, 刘增文, 袁娜, 等. 黄土高原小叶杨与其他树种枯落叶混合分解对养分释放的影响. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 1—5. Zhu Z H, Liu Z W, Yuan N, et al. Influence of nutrient-release of mix-leaf litter decay of *Populus simonii* with other trees in the Loess Plateau (In Chinese). Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 1—5
- [24] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. 生态学报, 2011, 31(17): 4985—4991. Wang K B, Shanguan Z P. Seasonal variations in leaf C, N, and P stoichiometry of typical plants in the Yangou watershed in the loess hilly gully region (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4985—4991
- [25] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2010, 30(23): 6581—6590. Liu W D, Su J R, Li S F, et al. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6581—6590
- [26] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? Biogeochemistry, 2007, 85: 235—252
- [27] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000. Huang C Y. Pedology (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [28] 河南省三门峡市水电局. 刺槐是阴坡水土保持优良树种之一. 水土保持通报, 1985, 5: 62—64. Henan Sanmenxia Hydroelectric Board. Blacklocust is one of the excellent tree species for soil and water conservation on shady slopes (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1985, 5: 62—64
- [29] Svensson M, Jansson P E, Gustafsson D, et al. Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand. Ecological Modelling, 2008, 213(34): 331—344

## ECOLOGICAL STOICHIOMETRIC RELATIONSHIPS BETWEEN COMPONENTS OF *ROBINIA PSEUDOACACIA* FOREST IN LOESS PLATEAU

Yang Jiajia<sup>1</sup> Zhang Xiangru<sup>1</sup> Ma Lusha<sup>1</sup> Chen Yanan<sup>1</sup> Dang Tinghui<sup>1,2</sup> An Shaoshan<sup>1,2†</sup>

(<sup>1</sup> College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(<sup>2</sup> State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** Ecological stoichiometric ratios of C, N and P are important characteristics of the process, and function of ecological system. *Robinia pseudoacacia* featuring fast-growing, strong adaptability and tolerance of aridity and sterility, is a major tree species in reforestation for soil and water conservation in the Loess Plateau. With *Robinia pseudoacacia* forests on the Loess Plateau as subject, a study was carried out on ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphate in leaf-litter-soil systems different in aspect and their correlations. Results show that: On both shady and sunny slopes, in term of C:N, the three components of the systems were in order of leaf > litter > soil, while in term of C:P and N:P in the order of litter > leaf > soil. There was no significant difference between sunny and shady slope in C:P, C:N and N:P in leaf, litter and soil ( $p > 0.05$ ); but there were between the two in leaf, litter ( $p < 0.05$ ). In soil C:P, C:N and N:P were all higher in the 0~10cm soil layer than in the 10~20cm soil layer, but the difference was not significant ( $p > 0.05$ ); No matter on sunny or shady slope, leaf was positively related to litter in C:N. On sunny slope, the positive correlation between leaf and litter in N:P was significant. While, on shady slope, the positive correlation between litter and soil in C:N was in the 0~10cm soil layer.

**Key words** Loess Plateau; *Robinia pseudoacacia*; Soil; Leaf; Litter; Ecological stoichiometry

(责任编辑: 檀满枝)