

DOI: 10.11766/trxb201601210502

云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态化学计量特征*

马任甜¹ 方 瑛¹ 安韶山^{1, 2†}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 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, 陕西杨凌 712100)

摘 要 碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 生态化学计量比是生态系统过程和功能的重要特征。为探究云雾山天然草地 30 年恢复演替过程中不同封育年限植物和枯落物的全碳、全氮和全磷含量及其生态化学计量特征变化规律, 以云雾山封育 1、12、20、30 年的天然草地为研究对象, 通过典型样方调查研究了黄土高原不同封育年限植物和枯落物养分变异特征。结果表明: 不同封育年限间, 植物地上部分 C:N、C:P、N:P 比变化范围分别为 24.91~37.37、380.1~562.1、12.14~15.86, 均值分别为 32.51、473.6 和 14.64; 枯落物 C:N、C:P、N:P 比变化范围分别为 37.18~47.11、755.5~885.9、16.41~22.31, 均值分别为 40.71、819.9、20.30。植物地上部分 C、N、P 含量间呈极显著相关 ($p < 0.01$); 植物地上部分 P 含量与 C:N、C:P、N:P 呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与枯落物 C、P、C:P、N:P 呈极显著相关 ($p < 0.01$)。云雾山植物 N:P 比介于 14~16 之间, 植物生长受氮磷共同限制, 建议增加草地氮、磷肥的使用量。该研究结果有助于进一步了解云雾山草地 C、N、P 在不同组分间的相互作用规律与机制。

关键词 生态化学计量学; 植物地上部分; 枯落物; 草地; 封育年限

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A

碳 (C) 是生命的骨架元素^[1], 通过光合作用同化的碳是植物生理生化过程的能量来源; 而氮 (N) 和磷 (P) 是植物的基本营养元素和生长限制元素^[2], 参与植物的关键生理活动过程。因此, 碳氮磷在植物生长发育过程中具有重要作用, 三者紧密联系, 不仅参与地球化学元素循环过程, 而且为植物的生长发育提供必需的营养元素。生态化学计量学 (Ecological stoichiometry) 是研究生态系统能量平衡和多种化学元素 (主要是 C、N、P) 平衡的科学, 是分析多重化学元素的质量平衡与生态系统相互影响的一种理论^[3]。

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补给土壤。枯落物自身的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植物养分自身的需求和调节起着关键作用^[4]。枯落物的养分状况在一定程度上反映了土壤的养分供应状况以及植物的养分利用状况。研究植物和枯落物的生态化学计量学特征对于揭示生态系统各组分之间的养分循环规律、阐明系统的稳定性以及促进生态化学计量学理论的发展具有重要意义, 同时对植被恢复的合理调控具有一定的科学意义。

云雾山自然保护区地处宁夏省固原市东北部,

* 国家自然科学基金项目 (41171226)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-2-0479) 和国家科技支撑计划课题 (2015BAC01B01) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41171226), the New Century Excellent Talents in University of China (No. NCET-2-0479) and the National Key Technology R&D Program of China (No. 2015BAC01B01)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 马任甜 (1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植被恢复与土壤固碳机制。E-mail: 1371105625@qq.com

收稿日期: 2016-01-21; 收到修改稿日期: 2016-05-04; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-05-17

建于1982年,是我国西北地区保护最完整、黄土高原保护最早的典型草原生态系统自然保护区^[5]。随着云雾山草地封育措施的实施,草地已经积累了大量的枯落物,并对植被的自然更新产生了影响。关于封育对于云雾山草地的影响,目前主要集中在对草地生产力、群落多样性、种子库和土壤理化性质等方面的研究,对不同封育年限草地植物地上部分和枯落物的生态化学计量关系关注较少。因此本研究选取该区域不同封育年限草地作为研究对象,运用生态化学计量学手段,研究不同封育年限植物地上部分和枯落物的生态化学计量学特征,探讨植物地上部分和枯落物的养分变化规律以及相互关系,对于理解养分循环具有重要的现实意义,为黄土高原植被恢复建设以及肥效管理提供理论支撑,同时为完善陆地退化生态系统生态化学计量学理论提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地设于宁夏固原市东北部云雾山自然保护区,总面积6 500 hm²,海拔1 800~2 100 m,坡度15°~40°,属长梁缓坡丘陵区。土层深厚,土壤类型为山地灰褐土和黑垆土。属中温带半干旱气候区,年均气温5℃,最热的7月22~25℃,最冷的1月-14℃,年均降水量400~450 mm(1983—2005年),其中7—9月占全年的65%~75%,蒸发量1 330~1 640 mm,年日照2 500 h,无霜期112~140 d。保护区封育之前,由于长期以来过度放牧和人类生产活动的影响,绝大多数天然草地受到放牧和人为干扰的破坏,生产力受到严重影响,造成较大的水土流失与养分损失,天然草地生态系统退化,生物多样性减少,荒漠化程度越来越严重。保护区自1982年封育,天然草地植被的恢复特别是半干旱区植被的恢复,经过人为封禁,排除了放牧及人为干扰后,采用自然修复的途径,不仅牧草生产力得到恢复,而且草地土壤水分和养分含量也有很大提高,从而使退化草地生态系统逐渐得到恢复,生态环境相应得到改善。保护区主要草本植物有铁杆蒿(*Artemisia vestita* Wall.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、阿尔泰狗娃花

(*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.)、百里香(*Thymus mongolicus* Ronn.)、白颖藁草(*Carex rigescens* Franch.)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis* L.)、直茎点地梅(*Androsace erecta* Maxim.)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)和厚穗冰草(*Aneurolepidium dasystachys* (Trin.) Kitag.)等,其中丛生禾本科植物本氏针茅分布最广^[5]。

1.2 样品采集

2014年8月在宁夏固原云雾山草原自然保护区内选取封育1、12、20、30年(1、12、20、30 a)的群落样地,在坡上部、中部和下部分别选择群落分布均匀、地势平坦一致的地区设置1条样线,以10 m为一个间隔,在选好的3条样线上分别设置5个1.0 m×1.0 m的小样方,在每个样方收取四分之一枯落物混合后密封带回实验室内作为枯落物样品,然后用剪刀将样方内所有草本的地上部分剪下,称重。取3条样带的平均地上生物量作为草地植物群落的地上生物量值。同时调查样地的立地条件,即海拔、坡度、坡向和土壤类型等,最后将样品带回实验室后,捡去植物及枯落物中的杂质,清洗干净植物及枯落物表面,于65℃烘干至恒重,称量,研细以备养分分析。

1.3 样品测定

用粉碎机将植物以及枯落物磨成0.15 mm的粉末后测定其全碳、全氮、全磷含量。植物与枯落物中全碳采用重铬酸钾—外加热法测定;全氮和全磷采用H₂SO₄-H₂O₂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, 北京),全磷采用钒钼黄比色法^[6]测定(UV-2450紫外分光光度计, Shimadzu公司, 日本)。

1.4 数据处理

植物和枯落物的碳、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,利用Origin 19.0软件进行作图。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)的最小显著差异(LSD)法对植物和枯落物相应的不同封育年限碳、氮、磷含量以及C:N、C:P、N:P比进行差异性检验,采用Pearson相关分析对植物和枯落物之间的C:N、C:P、N:P比进行相关性分析。

表1 研究样地概况

Table 1 General situation of the sampling plots

封育年限 Period of closing (a)	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Elevation (m)	主要物种 Dominant plants	总盖度 Coverage (%)	平均高度 Average height (cm)	地上生物量 Shoot biomass (g m ²)
1	106°24'15.83"E 36°09'59.03"N	1 775	长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin. 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit. 星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i> L. 阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> Novopokr.	31.4	6.5	171.9
12	106°24'48.46"E 36°10'30.73"N	1 764	百里香 <i>Thymus mongolicus</i> Ronn. 赖草 <i>Leymus secalinus</i> Tzvel. 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit. 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin.	57.3	18.1	295.5
20	106°22'55.87"E 36°16'30.35"N	2 079	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> Novopokr. 白颖藁草 <i>Carex rigescens</i> (Franch.) V. Krecz 百里香 <i>Thymus mongolicus</i> Ronn. 铁杆蒿 <i>Artemisia vestita</i> Wall.	94.5	33.8	510.8
30	106°23'15.76"E 36°16'2.14"N	2 083	铁杆蒿 <i>Artemisia vestita</i> Wall. 甘青针茅 <i>Stipa przewalskyi</i> Roshev. 阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> Novopokr.	98.8	34.3	780.1

2 结果

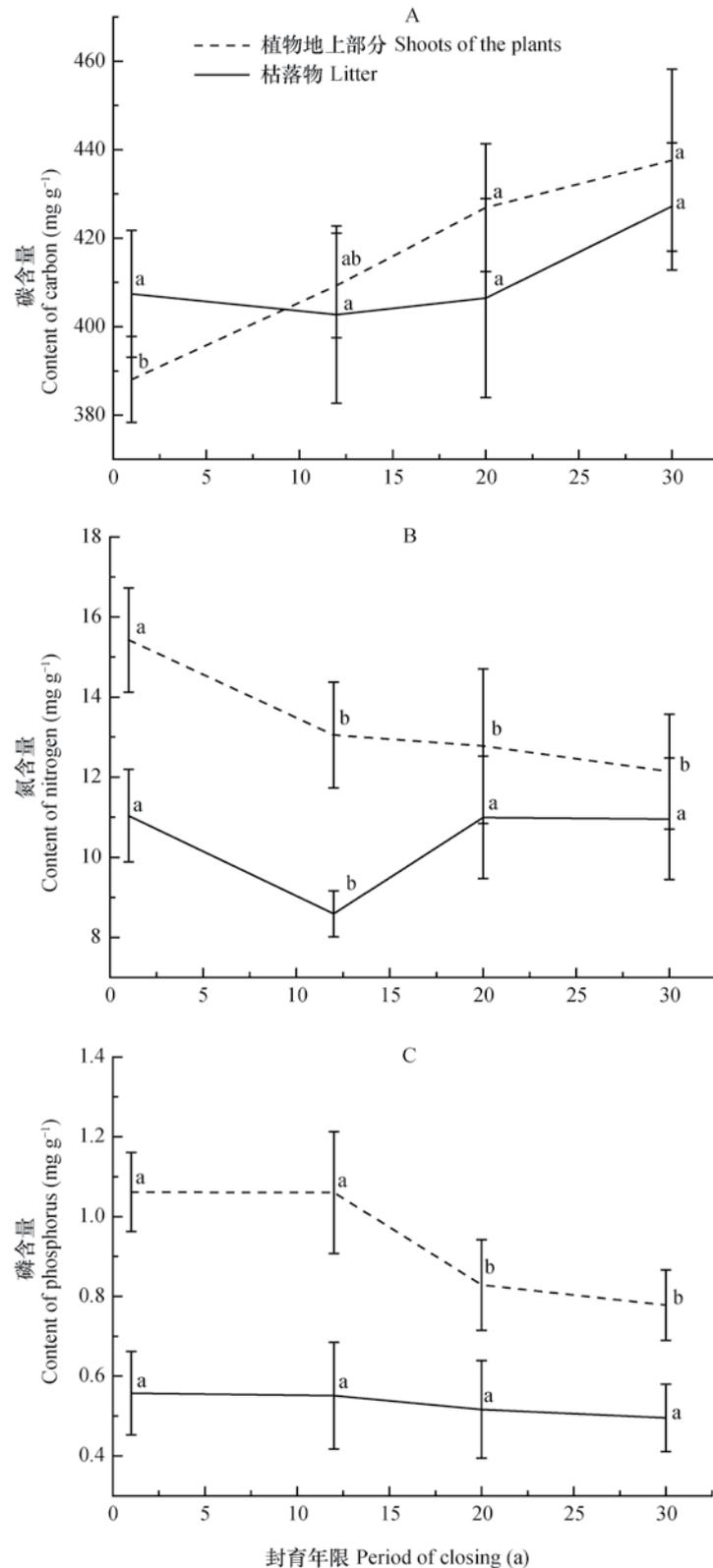
2.1 植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷含量变化

对不同封育年限云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷含量进行了统计分析(图1)。从图1可以看出,随着封育年限的增加,植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷含量表现为不同的变化规律及差异显著性。其中,植物地上部分碳含量不断增加,其变化范围为388.1~437.6 mg g⁻¹,均值为418.0 mg g⁻¹,碳含量在封育年限为1 a和20 a时存在显著性差异($p < 0.05$),20 a和30 a的碳含量差异不显著($p > 0.05$)(图1A)。枯落物碳含量呈先下降后上升的趋势,其变化范围为402.7~427.2 mg g⁻¹,均值为411.3 mg g⁻¹,碳含量在不同封育年限间差异不显著($p > 0.05$)(图1A)。植物地上部分和枯落物碳含量大小在封育年限为1 a时表现为枯落物 > 植物地上部分,在12 a到30 a之间表现为植物地上部分 > 枯落物。

随着封育年限的增加,植物地上部分氮含量

不断减小,其变化范围为12.13~15.42 mg g⁻¹,均值为13.16 mg g⁻¹,氮含量在封育年限为1 a时的大小显著高于12 a、20 a和30 a时的氮含量大小($p < 0.05$)(图1B)。枯落物氮含量变化呈先下降后上升的趋势,其变化范围为8.58~11.04 mg g⁻¹,均值为10.34 mg g⁻¹,氮含量在封育年限为12 a时氮含量达到最低,且显著低于其他封育年限氮含量($p < 0.05$)(图1B)。植物地上部分和枯落物氮含量大小表现为植物地上部分 > 枯落物。

随着封育年限的增加,植物地上部分磷含量不断减小,其变化范围为0.78~1.06 mg g⁻¹,均值为0.92 mg g⁻¹,1 a和12 a的植物地上部分磷含量差异不显著($p > 0.05$),20 a磷含量显著低于12 a磷含量($p < 0.05$)(图1C)。枯落物磷含量呈缓慢下降趋势,变化范围为0.49~0.56 mg g⁻¹,均值为0.53 mg g⁻¹,枯落物磷含量在不同封育年限间差异不显著($p > 0.05$)(图1C)。植物地上部分和枯落物磷含量大小表现为植物地上部分 > 枯落物,与氮含量大小顺序一致。



注：不同小写字母表示植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷含量在不同封育年限间差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters represent significant difference between plots of grasslands different in enclosure age in content of C, N and P in shoots and litter of the plants ($p < 0.05$)

图1 植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷含量特征

Fig. 1 Carbon, nitrogen and phosphorus contents in shoot and litter of the plants

2.2 植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态学计量特征

对不同封育年限云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷比值进行了分析(图2),不同组分的C:N、C:P和N:P比随封育年限增加表现出不同变化规律及差异显著性。其中,云雾山植物地上部分C:N比逐渐增加,变化范围为24.91~37.37,均值为32.51,12 a时的植物地上部分C:N比显著高于1 a时的C:N比($p < 0.05$),12 a、20 a和30 a时的C:N比差异不显著($p > 0.05$)(图2A)。枯落物C:N比呈先上升后下降的趋势,其变化范围为37.18~47.11,均值为40.71,12 a的C:N比显著高于1 a、20 a和30 a时的C:N比(图2A)。植物地上部分和枯落物C:N比大小表现为枯落物>植物地上部分。

随着封育年限的增加,植物地上部分C:P比逐渐增加,变化范围为380.1~562.1,均值为473.6,1 a与12 a的C:P比差异不显著($p > 0.05$),20 a与30 a的C:P比差异不显著($p > 0.05$),12 a与20 a的C:P比差异显著($p < 0.05$)(图2B)。枯落物C:P比变化范围为755.5~885.9,均值为819.9,不同封育年限间枯落物C:P比差异不显著($p > 0.05$)(图2B)。植物地上部分和枯落物C:P比大小表现为枯落物>植物地上部分。

随着封育年限的增加,植物地上部分N:P比呈先降低后升高的趋势,变化范围为12.14~15.86,均值为14.64,12 a时的N:P比显著低于1 a、20 a和30 a时($p < 0.05$)(图2C)。枯落物N:P比的变化趋势与植物地上部分的变化趋势一致,均为先降低后升高,枯落物N:P比的变化范围为16.41~22.31,均值为20.30,不同封育年限间枯落物N:P比差异不显著($p > 0.05$)(图2C)。植物地上部分和枯落物N:P比大小表现为枯落物>植物地上部分。

2.3 植物地上部分和枯落物碳、氮、磷化学计量学参数间的相关性

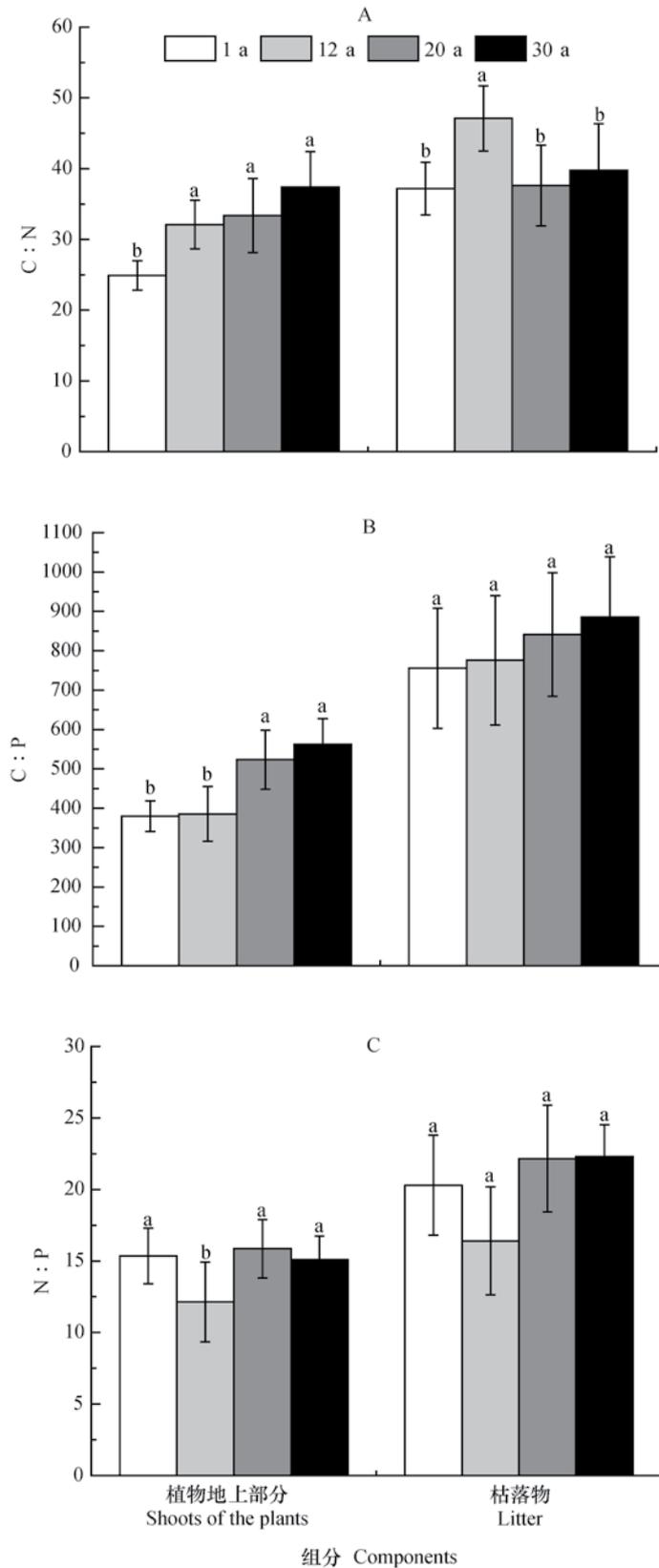
本研究对云雾山草地植物地上部分和枯落物C、N、P化学计量参数进行了Pearson相关性分析(表2),植物地上部分C、N、P含量之间呈极显著相关($p < 0.01$),其中C与N、P之间呈极显著负相关($p < 0.01$),植物地上部分P含量与C:N、C:P、N:P比之间呈极显著负相关($p < 0.01$),与枯落物C、P、C:P、N:P比呈极显著相关($p < 0.01$);枯落物P含量与枯落物C含量之间呈极显著负相关($p < 0.01$),枯落物C:P、N:P与植物地上部分C:P、N:P、枯落物C含量、P含量均呈极显著性相关($p < 0.01$)。总体上,植物地上部分C、N、P含量之间的相关性大于枯落物,植

表2 植物地上部分和枯落物C、N、P间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between shoots and litter of the plants in C, N and P content

	植物地上部分 Shoots of the plants						枯落物 Litter						
	C	N	P	C:N	C:P	N:P	C	N	P	C:N	C:P	N:P	
植物地上部分 Shoots of the plants	C	1	-0.369**	-0.378**	0.643**	0.625**	0.14	0.162	0.047	-0.054	0.006	0.082	0.074
	N		1	0.435**	-0.932**	-0.536**	0.298*	-0.055	0.126	0.075	-0.115	-0.148	-0.075
	P			1	-0.506**	-0.935**	-0.708**	-0.403**	-0.239	0.568**	0.122	-0.543**	-0.658**
	C:N				1	0.677**	-0.175	0.139	-0.054	-0.106	0.077	0.176	0.133
	C:P					1	0.600**	0.399**	0.21	-0.472**	-0.097	0.485**	0.585**
	N:P						1	0.397**	0.325*	-0.510**	-0.194	0.450**	0.619**
枯落物 Litter	C						1	0.119	-0.472**	0.257	0.589**	0.477**	
	N							1	0.229	-0.918**	-0.256	0.395**	
	P								1	-0.378**	-0.950**	-0.763**	
	C:N									1	0.454**	-0.225	
	C:P										1	0.758**	
	N:P											1	

注Note: *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$



注：不同小写字母表示植物地上部分和枯落物的C : N、C : P和N : P比在不同封育年限间差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters represent significant difference between plots of grasslands different in enclosure age in C : N, C : P and N : P in shoots and litter of the plants ($p < 0.05$)

图2 植物地上部分和枯落物的C : N、C : P、N : P变化特征

Fig. 2 Variation of C : N, C : P and N : P in shoots and litter of the plants

物地上部分P含量与植物和枯落物的相关性较大,植物地上部分和枯落物两两之间的C:P、N:P比相关性较大。

3 讨论

3.1 植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷总体特征

植物作为陆地生态系统的子系统,在调节整个系统的稳定性方面发挥着重要的作用。植物在生长过程中,通过光合作用生产有机物,并以枯落物分解和根系分泌的方式将养分归还于土壤中;枯落物分解产生养分,土壤养分得到相应的补给,为植物自身养分的调节和需求提供了条件^[4]。枯落物的养分状况在一定程度上反映了土壤的养分供应状况以及植物的养分利用状况。

云雾山不同封育年限植物吸收养分的种类、数量以及对养分的利用效率均存在差异。本研究结果表明,随着封育年限的增加,云雾山草地植物地上部分碳含量呈逐渐上升趋势,封育1 a、12 a、20 a和30 a的植物地上部分碳含量(分别为388.1、409.3、426.9、437.6 mg g⁻¹)均低于Elser等^[7]研究的全球492种陆生植物叶片碳平均含量464 mg g⁻¹,说明该研究区植物的有机质含量和碳储量较低。不同封育年限枯落物碳含量呈先下降后上升的趋势,碳含量在不同封育年限间差异不显著($p > 0.05$),在封育年限为1 a时枯落物碳含量大于植物地上部分,在12 a至30 a之间表现为植物地上部分碳含量高于枯落物,原因可能是在退耕封育初期,由于长期过度放牧和人类生产活动的影响,天然草地受到破坏,导致植物碳含量较低;随着封育年限的增加,经过人为封禁,牧草得到修养生息,地上枯落物不断积累,并在微生物作用下不断腐熟与分解,加上植物及根系分泌物对土壤和环境的修复作用^[8-9],促使草地土壤氮磷钾全量和速效养分进一步增加^[10],生态环境也得到相应改善,从而使植物碳含量得以提高。枯落物碳含量低于植物碳含量,这与枯落物分解有很大的关系,原因是枯落物在分解过程中初期分解粗有机化学成分中粗脂肪、可溶性糖和单宁,有机碳含量显著下降。这充分表明退化草地随着封禁时间的延长,生物量的生产和枯落物的分解增加了植物和土壤有机质总量,显著提高了植物有机质整体含量。

氮和磷作为植物生长最重要的限制元素,共

同参与了植物体的基本生理生化过程。云雾山植物地上部分氮平均含量为13.16 mg g⁻¹,低于Han等^[11]研究的全国753种陆地植物氮平均含量18.6 mg g⁻¹,且随着封育年限的增加植物地上部分氮含量呈下降趋势,其原因和该地区土壤氮含量较低有关^[12];另一方面是由于保护区经人为封育后,植物地上部分生物量逐渐提高,牧草的生长促进了氮素向地上植物器官重新分配,而且有限的氮要在地上和地下部分进行合理的分配,所以导致植物氮含量降低。不同封育年限植物地上部分磷平均含量为0.92 mg g⁻¹,明显低于全球范围内所研究的磷平均含量1.77 mg g⁻¹^[13],也低于我国753种陆地植物的磷平均含量1.21 mg g⁻¹^[11]。植物体内的磷绝大部分由根系从土壤中吸收^[14],该地区植物磷含量偏低与土壤磷含量较低有关^[10],植物生长过程中受到磷的限制。枯落物磷含量无明显的变化规律,这与枯落物自身质量、生物因素和环境因素等密切相关。而枯落物磷平均含量低于植物磷平均含量,说明植物在衰老过程中磷含量存在较高的转移率,养分重吸收明显^[15]。该研究结论支持占据较贫瘠生境的常绿植物具有较高养分重吸收率的观点^[16]。

3.2 植物地上部分和枯落物化学计量学特征关系

碳、氮、磷生态化学计量比是生态系统过程及其功能的重要特征,不同组分碳、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,植物体内C、N和P化学计量比体现了生态系统中碳积累动态及氮和磷养分限制格局^[17]。植物的C:N比和C:P比代表了植物固碳效率的高低,预示着植物在吸收营养过程中对碳的同化能力^[18],在一定程度上反映了植物的养分利用效率,具有重要的生态学意义。本研究中云雾山草地植物地上部分C:N比平均值为32.51, C:P比平均值为473.6,明显大于全球尺度内植物的C:N比和C:P比(分别为22.5和232)^[7],说明该研究区植物的养分利用效率相对较高,这与云雾山草地的气候条件和水热状况有关,加上草地覆盖较厚的枯落物层生态作用^[19],土壤养分富集作用较强,可供植物吸收利用的养分水平较高。植物吸收氮、磷营养元素的途径和碳同化不同,一般情况下碳的含量比较稳定,变异较小,C:N比和C:P比的变化主要由氮、磷的变化决定。本研究中植物地上部分C:N比和C:P比随封育年限的变化规律与氮、磷的变化规律相反,这说明氮、磷的变化决

定了C:N比和C:P比的变化,与上述规律一致。研究区枯落物C:N比为40.71,C:P比为819.9,相比喀斯特峰丛洼地植被群落枯落物C:N比25、C:P比427^[20]、浙江天童落叶阔叶林枯落物C:N比26.1、C:P比334.7^[21]均要大,但相比全球枯落物C:N比66.2、C:P比3144^[22]要小。枯落物C:N比和C:P比高于植物C:N比和C:P比,这是因为植物从土壤中吸收氮和磷,在叶片凋落之前又通过养分再吸收过程对氮、磷进行了重吸收^[23],使得枯落物氮、磷含量较为缺乏,因此枯落物中C:N比、C:P比均高于植物。

生态化学计量学应用的一个重要方面是可根据植物的N:P比判断环境对植物生长的养分供应状况^[24],陆地植物器官中相对恒定的N:P比是植物在地球上生存的重要适应机制。N:P比可很好地反映植物的生长速率,低N:P比表征植物较快的生长速率^[22]。Koerselman和Meuleman^[25]通过施肥实验得出,N:P比小于14表示植物生长受氮限制,N:P比大于16表示植物生长受磷限制,N:P比在14~16之间时,植物生长同时受氮和磷共同限制。Tessier和Raynal^[26]的研究同样指出湿地植物N:P比临界值为14和16。本研究中云雾山草地植物地上部分N:P比平均值为14.64,略高于Han等^[11]关于中国753种植物的平均值14.4,更高于全球的平均值12.7^[7],这说明我国的陆地植物相对于全球更缺少磷。云雾山植物地上部分N:P比平均值介于14和16之间,受氮与磷的共同限制,这与王凯博和上官周平^[27]对黄土丘陵区燕沟流域8种典型植物叶片的研究结果较为一致。同时N:P比是影响枯落物的分解和养分归还速率的重要因素之一,较低的N:P比值使枯落物更易分解,养分快速析出归还到土壤使得枯落物养分含量较低,云雾山草地枯落物N:P比值为20.30,相比全球枯落物N:P比值45.5^[22]要小,不利于养分的储存。本研究中植物C与N、P含量随环境不断变化,但相互之间具有明显的相关性,植物与枯落物C:P与N:P呈极显著正相关关系($p < 0.01$),说明植物能够随着周围环境的变化主动地调整养分需求,灵活地适应周围生长环境的变化。

本研究所选研究区域范围有限,若要更深一步了解植物、枯落物和土壤之间的相互作用及化学计量关系,还需要在云雾山开展更大尺度、更多类型

的“植物—枯落物—土壤”连续体的碳、氮、磷生态化学计量学研究。

4 结 论

云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷含量随封育年限增加的变化规律和差异显著性各不相同,其中封育30 a的植物地上部分和枯落物的碳含量大于1 a的碳含量,氮、磷含量随着封育年限的增加呈下降趋势,且植物地上部分氮、磷含量大于枯落物。因不同组分的碳、氮、磷含量差异性,使得C:N、C:P、N:P比随封育年限增加的变化规律和差异显著性也各不相同,其中植物地上部分C:N、C:P比随着封育年限的增加逐渐增加,且枯落物C:N、C:P、N:P比大于植物。相关性分析表明,植物地上部分C、N、P含量间呈极显著相关($p < 0.01$),植物地上部分P含量与枯落物C、P、C:P、N:P呈极显著相关($p < 0.01$),植物地上部分C、N、P含量的相关性大于枯落物C、N、P含量的相关性。该研究结果表明封育草地随着时间的变化,植被覆盖度、地上植物生物量和植物生产力不断提高,说明在该区采用封育措施可使草地植被生态系统呈现出全面恢复的趋势;云雾山植物生长受氮、磷共同限制,因此在云雾山草地的建设和恢复过程中,为了防止退化,合理开发利用草地,保持草地的可持续发展,建议增加草地氮、磷肥的施用。

参 考 文 献

- [1] 邓斌. 高寒草地不同演替阶段植被变化和土壤碳氮磷的生态化学计量研究. 兰州: 兰州大学, 2012
Deng B. The study about change of vegetation and C:N:P stoichiometry of soil in different succession stage in alpine grassland (In Chinese). Lanzhou: Lanzhou University, 2012
- [2] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10 (12): 1135—1142
- [3] 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. *生态学报*, 2008, 28 (8): 3937—3947
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and

- phosphorus elements (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (8): 3937—3947
- [4] Agren G I, Bosatta E. Theoretical ecosystem ecology—understanding element cycles. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 234—274
- [5] 宁夏云雾山草原自然保护区管理处. 宁夏云雾山自然保护区科学考察与管理文集. 银川: 宁夏人民出版社, 2001
- Grassland Nature Reserve Management Department of NingxiaYunwu Mountain. Collection of scientific research and management on the Yunwu Mountains Nature Reserve in Ningxia (In Chinese). Yinchuan: Ningxia People's Press, 2001
- [6] 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
- [7] Elser J J, Turner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3 (6): 540—550
- [8] 旷远文, 温达志, 钟传文, 等. 根系分泌物及其在植物修复中的作用. *植物生态学报*, 2003, 27 (5): 709—717
- Kuang Y W, Wen D Z, Zhong C W, et al. Root exudates and their roles in phytoremediation (In Chinese). *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, 27 (5): 709—717
- [9] 孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤-根系-微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展. *土壤*, 2015, 47 (2): 210—219
- Sun B, Liao H, Su Y H, et al. Advances in key coordinative mechanisms in soil-root-microbe systems to affect nitrogen and phosphorus-utilization (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (2): 210—219
- [10] 程杰, 高亚军. 云雾山封育草地土壤养分变化特征. *草地学报*, 2007, 15 (3): 273—277
- Cheng J, Gao Y J. Variability of soil nutrient in enclosed grassland of Yunwu Mountain (In Chinese). *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15 (3): 273—277
- [11] 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
- [12] 李金芬. 云雾山草地土壤有机碳全氮含量与分布特征. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009
- Li J F. Content and distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen of grassland in Yunwu Mountain (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009
- [13] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101 (30): 11001—11006
- [14] 耿燕, 吴漪, 贺金生. 内蒙古草地叶片磷含量与土壤有效磷的关系. *植物生态学报*, 2011, 35 (1): 1—8
- Geng Y, Wu Y, He J S. Relationship between leaf phosphorus concentration and soil phosphorus availability across Inner Mongolia grassland (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35 (1): 1—8
- [15] 汤璐瑛. 木本植物叶片养分重吸收研究. 北京: 北京大学, 2012
- Tang L Y. Nutrient resorption proficiency and efficiency of woody plants (In Chinese). Beijing: Peking University, 2012
- [16] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1—67
- [17] 栗忠飞, 郭盘江, 刘文胜, 等. 哀牢山常绿阔叶林幼树C、N、P生态化学计量特征. *东北林业大学学报*, 2013, 41 (4): 22—26
- Li Z F, Guo P J, Liu W S, et al. C, N and P stoichiometry of young trees in montane moist evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains (In Chinese). *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41 (4): 22—26
- [18] 羊留冬, 杨燕, 王根绪, 等. 短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其CNP化学计量学特征的影响. *生态学报*, 2011, 31 (13): 3668—3676
- Yang L D, Yang Y, Wang G X, et al. Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of *Abies fabiri* (Mast.) Craib seedling in Gongga Mountain (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (13): 3668—3676
- [19] 王顺利, 王金叶, 张学龙, 等. 祁连山青海云杉林苔藓枯落物分布与水文特性. *水土保持研究*, 2006, 13 (5): 156—159
- Wang S L, Wang J Y, Zhang X L, et al. Distribution of withered litters of moss and hydrographic characteristics in the *Picea crassifolia* forestry on Qilian Mountain (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13 (5): 156—159
- [20] 邴源皓, 刘增文, Luc Nhu Trung, 等. 陕北黄土陵区牧草枯落物对针叶纯林土壤极化的修复效应. *土壤学报*, 2014, 51 (4): 897—905
- Bing Y H, Liu Z W, Luc N T, et al. Remedying effect

- of forage litters on soil polarization of pure coniferous forest in semi-humid loess hilly area of North Shaanxi (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4): 897—905
- [21] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的C:N:P化学计量特征. *植物生态学报*, 2010, 34 (1): 48—57
Yan E R, Wang X H, Guo M, et al. C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forest, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34 (1): 48—57
- [22] Elser J J, Acharya K, Kyle M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 2003, 6 (10): 936—943
- [23] 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. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 133—142
Yang J J, Zhang X R, Ma L S, et al. Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 133—142
- [24] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29 (6): 1007—1019
Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (6): 1007—1019
- [25] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33 (6): 1441—1450
- [26] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40 (3): 523—534
- [27] 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, Shangguan 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

Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and C : N : P in Shoots and Litter of Plants in Grassland in Yunwu Mountain

MA Rentian¹ FANG Ying¹ AN Shaoshan^{1, 2†}

(¹ College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

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

Abstract 【Objective】 Balance between various elements in the ecosystem has been a focus or a hotspot of the researches on ecology and biogeochemical cycles under global change. Ecological stoichiometry is a science that combines some basic principles of biology, physics and chemistry, explores for balance of energy and balance of various chemical elements in biological systems and provides an integrated approach to investigating rules of the behaviors of various elements in biogeochemical cycling and ecological processes and their stoichiometric relationships. Ecological stoichiometric ratios of C, N and P are important characteristics of the process and function of an ecological system. 【Method】 In order to explore variation rules of the contents of organic carbon, nitrogen and phosphorus in shoots and litter of plants and C : N : P stoichiometry characteristics during various enclosure phases of the 30 years of restoration and succession process of natural grasslands in the Yunwu Mountain, typical quadrats of grassland that had been enclosed for restoration for 1, 12, 20 and 30 years were set up for analysis of nutrient contents in shoots and litter of the plants in the grasslands and their relationships with enclosure age in the Loess Plateau. 【Result】 Results showed that carbon, nitrogen and phosphorus contents in shoots and little of the plants and their stoichiometry

varied sharply with enclosure age. Carbon, nitrogen and phosphorus content varied in the range of 388.1 ~ 437.6 mg g⁻¹, 12.13 ~ 15.42 mg g⁻¹ and 0.78 ~ 1.06 mg g⁻¹, being 418.0 mg g⁻¹, 13.16 mg g⁻¹ and 0.92 mg g⁻¹, on average, respectively in shoots of the plants; and in the range of 402.7 ~ 427.2 mg g⁻¹, 8.58 ~ 11.04 mg g⁻¹ and 0.49 ~ 0.56 mg g⁻¹, being 411.3 mg g⁻¹, 10.34 mg g⁻¹ and 0.53 mg g⁻¹ on average, respectively; and C : N, C : P and N : P ratio in the range of 24.91 ~ 37.37, 380.1 ~ 562.1 and 12.14 ~ 15.86, being 32.51, 473.6 and 14.64, respectively, in shoots of the plants, and in the range of 37.18 ~ 47.11, 755.5 ~ 885.9 and 16.41 ~ 22.31, being 40.71, 819.9 and 20.30, respectively in litter of the plants. In terms of average of the content of nitrogen and phosphorus shoots of the plants was higher than litter of the plants, while in terms of average of the C : N, C : P and N : P ratio a reverse trend was found. It is known that N : P ratio is an important factor that controls litter decomposition and nutrient cycling. Litter, low in P concentration was often high in N and lignin content (or in N : P ratio) and decomposed slowly, while litter low in N : P ratio decomposed easily. As litter of the plants in the grassland of the Yunwu Mountain was low in N : P ratio, it decomposed relatively fast, and kept little nutrients in storage. C, N and P contents in shoots of the plants were extremely significantly correlated with each other ($p < 0.01$); P content in shoots of the plants was in extremely significant negative relationships with the C : N, C : P and N : P ratio ($p < 0.01$), while C and P contents and C : P and N : P ratios in litter were extremely significantly related to P content in shoots of the plants. N : P ratio in the plants of Yunwu Mountain varied between 14 to 16. As plant growth was affected jointly by N and P, it is recommended that application of N and P fertilizers be increased in rate so as to prevent degradation, rationalize exploitation and maintain sustainable development of the grasslands. 【Conclusion】 This comprehensive research shows that enclosure can increase vegetation coverage, biomass of the plants, and plant productivity of the grassland and the measure in this area can make the grassland vegetation ecosystem present a trend of comprehensive recovery. The findings of this study help further understand rules and mechanisms of the interactions of carbon, nitrogen and phosphorus on different components of the grasslands in the Yunwu Mountain.

Key words Ecological stoichiometry; Shoots of plants; Litter; Grassland; Enclosure age

(责任编辑: 陈荣府)