

DOI: 10.11766/trxb201603140545

黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征^{*}

赵晓单^{1, 3} 曾全超² 安韶山^{1, 3†} 方瑛² 马任甜²

(1 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)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 黄土高原特别是干草原地区植被演替的研究比较薄弱。当前植物生态化学计量学的研究主要集中在植物叶片方面, 对根系的研究较少。选取宁夏云雾山草原植被不同封育年限的土壤和植物样品, 以生态化学计量学原理为基础, 测定并分析了土壤与根系的碳(C)、氮(N)、磷(P)及其生态化学计量比与相互关系。结果表明: (1) 随着封育年限的增加, 土壤容重逐渐减小, 土壤有机碳和全氮变异性较大, 全磷变异性较小, 且封育初期土壤有机碳和全氮含量先降后升, 至封育20、30年, 保持相对平稳。 $0\sim20\text{ cm}$ 土层土壤的碳氮比(C:N)、碳磷比(C:P)、氮磷比(N:P)分别为9.04~9.63、19.62~32.27、2.14~3.37, $20\sim40\text{ cm}$ 土层土壤的分别为8.68~9.22、15.74~26.32、1.80~3.03。土壤有机碳与全氮、全磷之间存在极显著的正相关。(2) 植物根系C、N、P含量变化范围分别为 $357.6\sim381.4\text{ g kg}^{-1}$ 、 $7.35\sim8.18\text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.54\sim0.70\text{ g kg}^{-1}$; 根系中的C元素含量随封育年限的增加逐渐升高, N、P元素含量均小于全球平均值。根系C:N随着封育年限的增加变异性较大, C:P、N:P随着封育年限的增加变异性较小。(3) 植物根系的C:N:P化学计量特征受土壤的影响调控大于其自身, 且土壤磷含量对植物根系C:N:P生态化学计量特征影响的显著性($p<0.01$)大于土壤氮含量($p<0.05$)。此外, 该地区封禁后, 草地生产力易受到土壤N含量的限制。

关键词 云雾山; 封育年限; 土壤; 根系; 生态化学计量学; 碳氮磷

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

生态化学计量学是研究生态交互作用过程中不同层次化学元素(主要是碳(C)、氮(N)、磷(P))的平衡和比率对生命系统各层次结构和功能影响的科学, 也是研究土壤与植物相互作用及其C、N、P养分循环的有效工具^[1-3]。C、N、P是生命体最重要的生源元素, 其中C是构成生物体的物质基础, N和P是各种蛋白质和遗传物质的重

要组成元素, 也是植物生长的限制性元素^[3-4]。目前, 国内外C:N:P生态化学计量学已经广泛应用于种群动态、凋落物分解、养分利用效率、微生物营养、限制性元素判断及森林演替与衰退、物种组成及其多样性等研究中, 涵盖了海洋、湿地、森林、草原与荒漠等不同生态系统, 并取得了丰富的研究成果^[5-6, 8]。土壤为植物生长发育提供养分,

* 国家自然科学基金项目(41171226)、教育部新世纪优秀人才项目(NCET-2-0479)和陕西省自然科学基础研究计划项目(2011JM5011)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41171226), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (No. NCET-2-0479) and the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (No. 2011JM5011)

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

作者简介: 赵晓单(1990—), 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: zhaoxiaodan719@163.

com

收稿日期: 2016-03-14; 收到修改稿日期: 2016-04-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-06-13

土壤—植物C、N、P化学计量生态学的研究为认识土壤—植物相互作用的养分调控因素提供帮助,且土壤—植物C:N:P的差异是一个分析生态系统结构的工具^[5, 7]。目前,植物生态化学计量学的研究主要集中在植物叶片方面,对植物根系的研究较少,而根系C、N、P的分解释放是营养物质迁移循环的重要组成部分,因此开展根系生态化学计量学特征的研究以及土壤与植物根系生态化学计量比的相互关系具有重要意义。

黄土高原生态环境极其脆弱,是全国水土流失最严重的地区之一。自退耕还林(草)措施实施以来,当地政府积极采取封禁措施,进行草地改良和培育,并取得了初步成效,然而植被演替的过程必然会影响土壤—植物养分循环,进而影响生态系统植被恢复与重建^[9-11]。目前,黄土高原植被演替的研究已有报道,但西北黄土高原特别是干草原地区植被演替的研究比较薄弱。故本文选取宁夏云雾山草原自然保护区为研究对象,采集不同封育年限草原植被(1年、12年、20年和30年)的土壤和植物样品,研究黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系C、N、P及其生态化学计量比的变化与相互关系,对草原生态系统的物质循环研究以及植被生态系统养分限制的判定提供依据,并为准确评价退耕还牧和封育草地等政策、措施的生态效益提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云雾山草原位于宁夏回族自治区固原市原州区东北部,地理坐标为东经 $106^{\circ}21' \sim 106^{\circ}27'$,北纬 $36^{\circ}10' \sim 36^{\circ}17'$ 。地处祁连山地槽东翼与鄂尔多斯台地西缘之间,居黄河流域上游,黄土高原的中间地带。海拔 $1\ 800 \sim 2\ 100\text{ m}$,黄土层覆盖深厚,地势南低北高,南坡平缓,北坡较陡,为黄土覆盖的低山丘陵区。土壤以山地灰褐土和黑垆土为主。云雾山处于中温带半干旱气候区,具有典型的半干旱气候特征,大陆性气候明显。气候特点是干燥,雨量少而集中,蒸发强烈,冬季寒长,夏季热短,温差大,日照长,光能丰富;冬春季风多,无霜期较短。年平均气温为 5°C ,年平均无霜期137 d,年平均降水量445 mm。该区域严重缺水,地表水很少,水资源补给主要靠大气降水。

1.2 样品采集与测定

于2014年8月在宁夏固原云雾山草原自然保护区内分别选取封育1、12、20、30年($1\text{、}12\text{、}20\text{、}30\text{ a}$)的群落样地,样地分布的主要物种有长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、铁杆蒿(*Artemisia vestita* Wall.)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.)和百里香(*Thymus mongolicus* Ronn.)等。由坡上至坡下选取植被群落分布均匀、地势平缓一致的地段,设置5个 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 的样方,调查样地的立地条件。用土钻分别采集 $0 \sim 20\text{ cm}$ 和 $20 \sim 40\text{ cm}$ 土层的土壤样品,挑出细根、石块等杂物,混匀风干后过100目筛装入自封袋中备测。在每个样方内选择四分之一的面积用铁锹挖取 $0 \sim 20\text{ cm}$ 土层,入16目的筛子中取其所有根系,然后小心去除根系表面的土壤、砾石等杂质。根据颜色、韧性等方法去除死根,保留活根。最后于室内将植物根系清洗干净后置于烘箱内(70°C)烘干至恒重,再研磨粉碎过100目筛后放入塑封袋中备测。

土壤容重采用环刀法,土壤含水率采用 105°C 烘干法。土壤和根系全碳测定采用重铬酸钾容量法一外加热法;土壤全氮采用凯氏定氮法,全磷采用高氯酸-硫酸消化—钼锑抗比色法;根系全氮、全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,其中全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钒钼黄比色分光光度法测定。

1.3 数据处理

本研究中土壤与植物根系C、N、P比均采用元素质量比,所有实验数据在Excel 2007和SPSS 21.0统计软件中整理、作图和分析。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)的最小显著差异(LSD)法对土壤和根系碳氮磷及其化学计量比进行差异显著性检验,并采用Pearson相关系数法对各个指标之间进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同封育年限草地土壤的理化性质

不同封育年限土壤的基本理化性质见表1。土壤容重在 $0 \sim 20\text{ cm}$ 土层为 $0.85 \sim 1.81\text{ g cm}^{-3}$,封育30年最低,1年最高; $20 \sim 40\text{ cm}$ 土层在 $1.01 \sim 1.09\text{ g cm}^{-3}$ 之间变化,封育1~12年保持不变,12~30年逐年下降。土壤含水率 $0 \sim 20\text{ cm}$ 土层演替30年最高,大小顺序为封育30年>12年>20年>1年,

表1 不同封育年限草地土壤的理化性质

Table 1 Soil physiochemical properties of grasslands different in enclosure history

封育年限 Number of years of enclosure (a)	土层 Soil depth	容重 Bulk density	含水率 Soil moisture	有机碳 Organic carbon	全氮 Total N	全磷 Total P
	(cm)	(g cm ⁻³)	(%)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)
1	0~20	1.18±0.02Ab	15.66±0.27Aa	16.15±1.12Ab	1.75±0.16Ac	0.68±0.09Aa
	20~40	1.09±0.00Bb	14.07±0.18Ab	10.74±1.21Bb	1.22±0.14Bb	0.58±0.05Ab
12	0~20	1.15±0.03Ab	18.06±0.34Aa	12.88±2.29Ac	1.41±0.27Ab	0.66±0.07Aa
	20~40	1.09±0.02Bb	8.53±0.27Aab	9.58±2.28Bb	1.09±0.28Bb	0.61±0.06Ab
20	0~20	0.88±0.00Aa	16.58±0.37Aa	22.37±3.65Aa	2.48±0.47Aa	0.74±0.10Aa
	20~40	1.02±0.02Bab	14.43±0.41Ab	18.45±4.00Ba	2.12±0.43Aa	0.70±0.08Aa
30	0~20	0.85±0.01Aa	21.92±0.41Aa	21.90±1.90Aa	2.28±0.22Aa	0.68±0.07Aa
	20~40	1.01±0.06Ba	13.45±0.32Aa	17.13±2.46Ba	1.86±0.23Ba	0.66±0.11Aab

注: 不同小写字母表示同一土层不同封育年限之间差异显著($p < 0.05$), 不同大写字母表示同一封育年限不同土层之间差异显著($p < 0.05$)。下同 Note: The different lowercase letters affixed to the data denote significant difference at 0.05 level between soils the same in soil layer, but different in enclosure history. The different capital letters affixed to the data denote significant difference at 0.05 level between soils the same in enclosure history, but different in soil layer. The same below

0~20 cm 土层土壤含水率均高于20~40 cm 土层。土壤有机碳、全氮、全磷含量在不同封育年限的含量均表现为0~20 cm 土层显著高于20~40 cm 土层, 而两个土层养分的变化规律大致相同。土壤有机碳含量介于9.58~22.37 g kg⁻¹, 0~20 cm 土层和20~40 cm 土层均以封育20年含量最高, 30年和1年居中, 12年最低。土壤全氮含量介于1.09~2.48 g kg⁻¹, 不同年限间的变化同土壤有机碳变化一致。土壤全磷的变异性较小, 以封育20年0~20 cm 土层含量最大, 封育1年20~40 cm 土层含量最小。总体而言, 土壤容重随草地封育年限的增加而降低, 土壤含水率随土层深度有所降低, 土壤有机碳和全氮含量变异较大, 但总体上表现为较封育1年, 封育12年有所下降, 封育20年明显升高, 封育30年趋于稳定。土壤全磷含量较稳定。

2.2 不同封育年限草地土壤C、N、P的生态化学计量特征

如图1所示, 0~20 cm 土层土壤C:N的变化范围为9.04~9.63, 平均值为9.28, 变异系数为6.03%; 土壤C:P的变化范围为19.62~32.27, 平均值为26.63, 变异系数为8.98%; 土壤N:P的变化范围为2.14~3.37, 平均值为2.87, 变异系数为10.10%。20~40 cm 土层土壤C:N的变化范围为8.68~9.22, 平均值为8.89, 变异系数为4.27%; 土壤C:P的变化范围为15.74~26.32, 平均值

为21.66, 变异系数为13.90%; 土壤N:P的变化范围为1.80~3.03, 平均值为2.44, 变异系数为13.77%。

整体而言, 土壤C:N、C:P、N:P均较稳定, 变异系数均不大。不同封育年限土壤C:N差异较小, 封育30年最大。土壤C:P、N:P变化趋势一致, 较封育1年, 封育12年有所下降, 封育20年明显升高, 封育30年趋于稳定。这是因为土壤全磷含量较稳定, 土壤C:P、N:P受C、N元素含量的影响, 因此土壤C:P、N:P与有机碳和全氮变化规律一致。

2.3 不同封育年限草地根系C、N、P的变化

如图2所示, 封育30年样地根系全碳、全氮和全磷的含量分别为408.8 g kg⁻¹、7.89 g kg⁻¹、0.54 g kg⁻¹; 封育20年根系全碳、全氮、全磷的含量为399.7 g kg⁻¹、7.35 g kg⁻¹、0.58 g kg⁻¹; 封育12年根系全碳、全氮和全磷的含量分别为381.1 g kg⁻¹、7.48 g kg⁻¹、0.70 g kg⁻¹; 封育1年根系全碳、全氮、全磷的含量为357.5 g kg⁻¹、8.18 g kg⁻¹、0.59 g kg⁻¹。不同封育年限样地根系全碳在357.5~408.8 g kg⁻¹之间变化, 封育30年的样地最大, 封育1年最小。LSD分析表明, 封育30年的根系全碳显著高于封育1年($p < 0.05$), 封育20年和封育12年差异不显著, 但二者显著高于封育1年。不同封育年限根系全氮在7.35~8.18 g kg⁻¹之

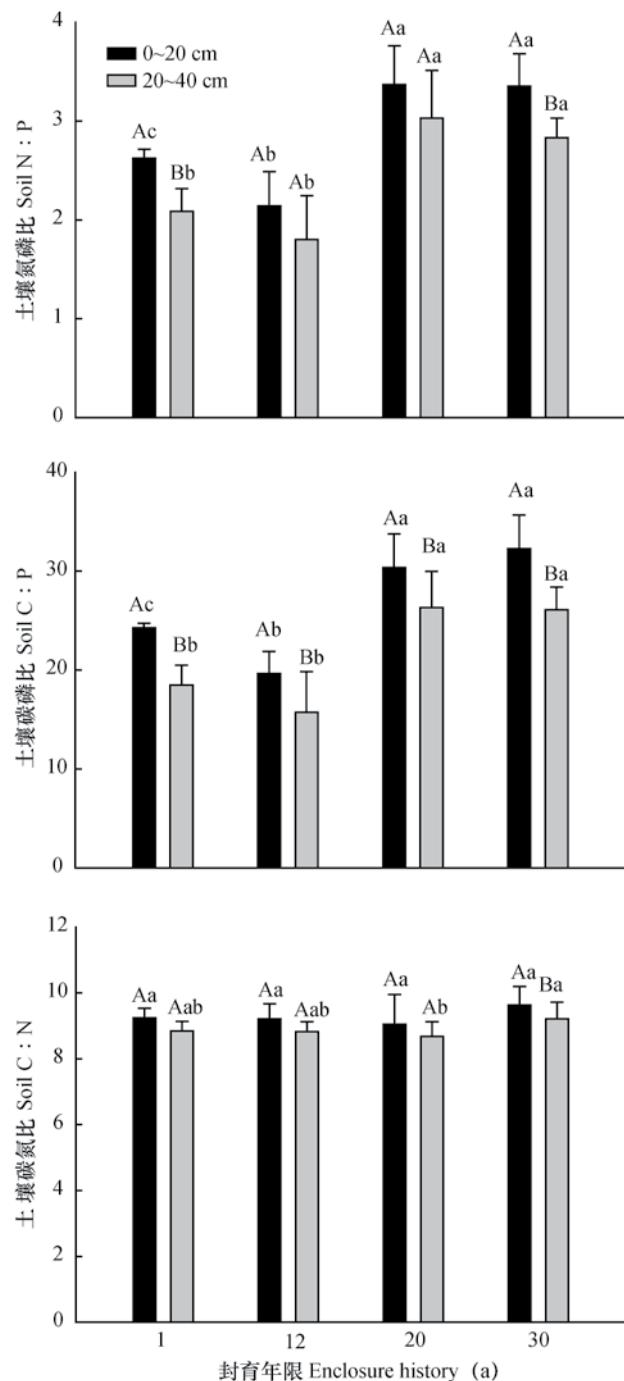
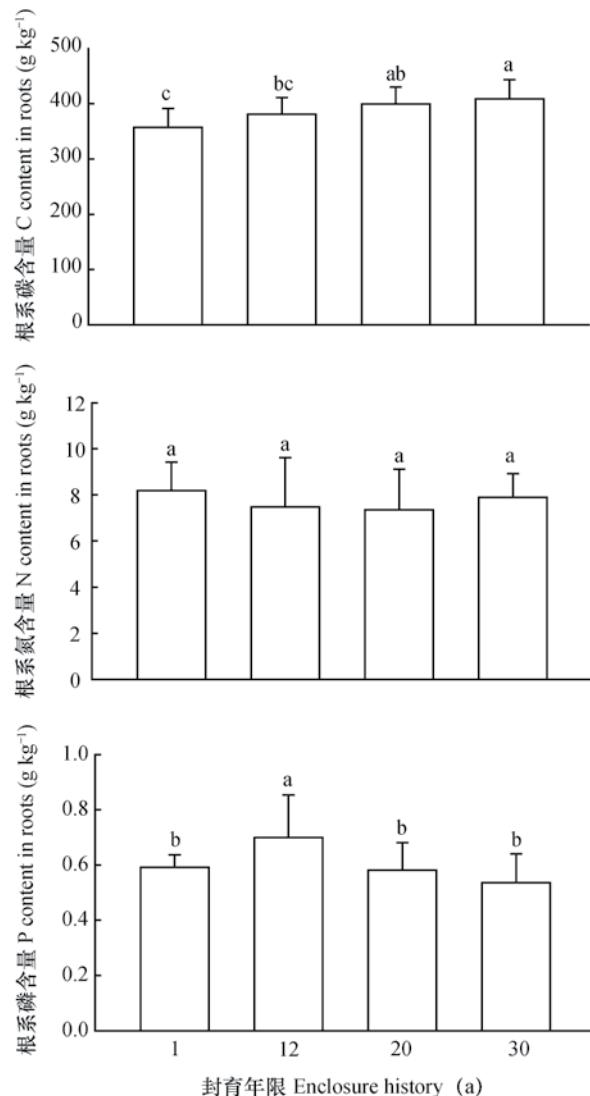


图1 土壤碳氮磷比随封育年限变化规律

Fig. 1 C : N : P in the soil relative to enclosure history

间变化，封育1年最大，封育20年最小。LSD分析表明，不同封育年限样地根系全氮差异不显著，但封育1年高于其他封育年限。不同封育年限根系全磷在 $0.54 \sim 0.70 \text{ g kg}^{-1}$ 之间变化，封育12年较其他封育年限差异显著，而封育1年、封育20年和封育30年之间差异不显著。大小顺序为封育12年>1年>20年>30年。

注：不同小写字母表示不同封育年限之间差异显著 ($p < 0.05$)，下同

Note: The different letters denote significant difference at 0.05 level between soils different in enclosure

history, the same below

图2 根系碳氮磷随封育年限变化规律

Fig. 2 Carbon, nitrogen and phosphorus in plant roots relative to enclosure history

2.4 不同封育年限草地根系C、N、P的生态化学计量特征

如图3所示，封育30年根系C:N、C:P、N:P的比值分别为53.09、793.9、15.14；封育20年根系C:N、C:P、N:P的比值为59.02、708.1、12.96；封育12年根系C:N、C:P、N:P的比值为55.43、574.7、10.87；封育1年根系C:N、C:P、N:P的比值为44.52、608.8、

13.89。不同封育年限根系C:N在44.52~59.02之间变化, 平均值53.01, 变异系数为28.07%; 根系C:P的变化范围为574.7~793.9, 平均值为671.3, 变异系数为22.38%; 根系N:P的变化范围为10.87~15.14, 平均值为13.21, 变异系数为22.79%。

从整体来看, 根系C:N在封育年限之间的差异较大, 其中封育30年和封育12年差异不显著, 封育20年最大, 封育1年最小。根系C:P、N:P在不同封育年限之间的差异较小。具体而言, 较封育1年和封育12年根系C:P、N:P比值, 随着封育年限的增加, 封育12年和封育30年比值逐渐升高, 且

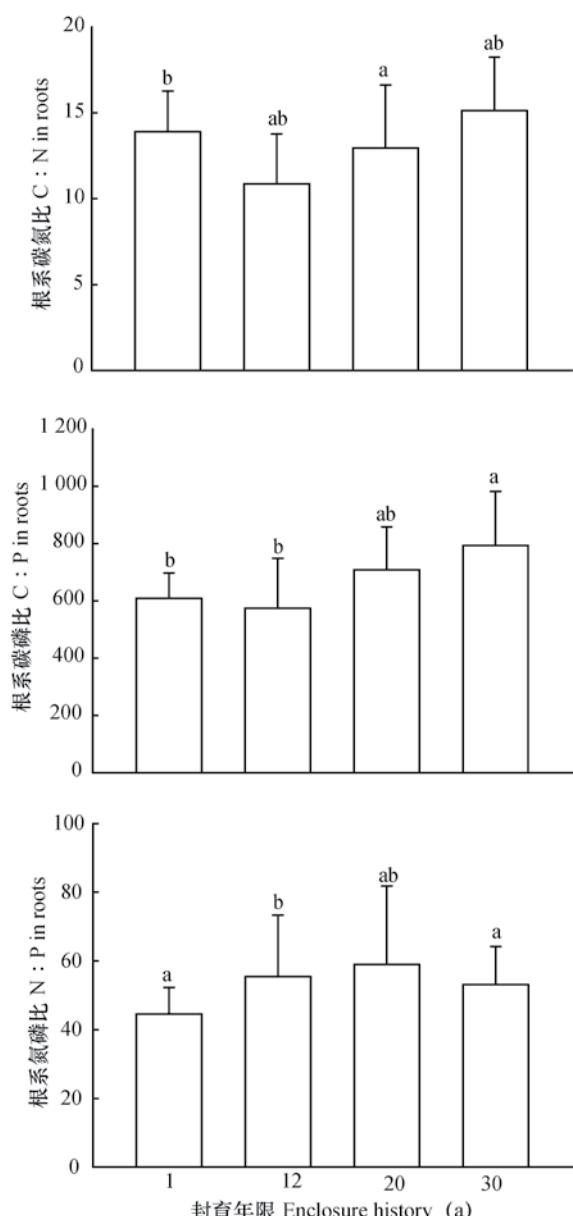


图3 根系碳氮磷比随封育年限变化规律

Fig. 3 C:N:P in plant roots relative to enclosure history

LSD分析表明封育30年和封育20年差异不显著, 并在封育30年达到一个最大值。

2.5 不同封育年限草地土壤与根系C、N、P及与其化学计量比的关系

如表2所示, 对不同封育年限草地土壤与根系全碳、全氮、全磷及其化学计量比之间的相关性分析得出: 土壤有机碳和全氮、全磷, 全氮和全磷, 土壤全磷和C:N, 土壤全氮和C:P, 土壤C:N和C:P均具有极显著正相关关系($p < 0.01$), 土壤C:P和N:P之间存在显著的相关关系($p < 0.05$); 土壤全磷、土壤C:N、土壤C:P和根系全碳存在极显著正相关关系($p < 0.01$), 土壤有机碳和根系全碳、根系N:P, 土壤全氮和根系全碳、根系C:P、根系N:P之间具有显著的相关关系($p < 0.05$); 根系C:P和N:P存在显著的相关关系($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同封育年限对土壤理化性质及其生态化学计量比的影响

土壤容重的大小受土壤质地、土壤结构以及土地利用方式的影响, 它是一个反映土壤具有较长时间变异性的动态属性^[12-13]。本研究中, 草地植被演替发生在土壤质地和结构相似的毗连试验区。经过30年的草地封禁, 草地植被的群落演替以后, 土地利用方式和地上生物量等都发生了变化, 从而导致土壤容重发生变化。在土层0~20 cm及20~40 cm深度, 土壤容重随着封育年限的增加逐渐减小。这主要是由于经过三十年的草地封育和自然演替, 放牧活动的控制, 减少了牲畜的活动和踩踏, 草本植物归还土壤。随着有机质含量的增加, 草地养分得到了积累, 土壤结构得到改善, 从而形成团粒结构等良好结构。这进一步改善了土壤表层的土壤性状, 孔隙、通气性及生物活性增加, 有利于草本植物生长, 促进更高量的生物归还, 有效降低了土壤容重。

本研究中, 土壤养分随着土层的加深而降低, 这与魏孝荣和邵明安^[14]得出的实验结论一致。这是因为表层土壤受植被枯落物养分归还的影响, 使养分先在土壤表层聚集, 再随其他介质向土壤下层迁移扩散^[15]。土壤有机碳与全氮变化具有一致性, 这与黄土高原不同纬度下刺槐林土壤的碳氮

表2 土壤与根系碳氮磷及其化学计量比之间的相关性

Table 2 Correlation analysis of C, N and P contents and stoichiometric ratio in the soil and plant root

	土壤有机碳 ^①	土壤全氮 ^②	土壤全磷 ^③	土壤C : N ^④	土壤C : P ^⑤	土壤N : P ^⑥	土壤全碳 ^⑦	根系全氮 ^⑧	根系全磷 ^⑨	根系C : N ^⑩	根系C : P ^⑪	根系N : P ^⑫
土壤有机碳 ^①	1	0.966**	0.927**	—	—	0.126	0.636*	0.148	-0.554	-0.018	0.594	0.666*
土壤全氮 ^②		0.991**	—	0.924**	—	0.709*	0.087	-0.529	0.083	0.615*	0.606*	
土壤全磷 ^③			0.988**	—	—	0.752**	0.062	-0.481	0.129	0.598	0.544	
土壤C : N ^④				0.991**	0.564	0.773**	0.057	-0.427	0.151	0.572	0.490	
土壤C : P ^⑤					0.659*	0.760**	0.114	-0.373	0.109	0.528	0.472	
土壤N : P ^⑥						0.491	0.161	0.158	0.059	0.053	-0.037	
根系全碳 ^⑦							-0.180	-0.308	—	—	0.252	
根系全氮 ^⑧								0.396	—	-0.429	—	
根系全磷 ^⑨									-0.330	—	—	
根系C : N ^⑩										0.479	-0.238	
根系C : P ^⑪											0.719*	
根系N : P ^⑫												1

注：**、*分别表示0.01、0.05水平（双侧）显著相关；“—”表示存在自相关关系，不宜进行相关分析 Note: **denotes very significant difference at 0.01 level, *denotes significant difference at 0.05 level; “—” denotes auto-correlation, unsuitable for Correlation Analysis. ①Soil organic carbon; ②Soil total N; ③Soil total P; ④C: N in soil; ⑤C: P in soil; ⑥N: P in soil; ⑦Root total C; ⑧Root total N; ⑨Root total P; ⑩C: N in root; ⑪C: P in root; ⑫N: P in root

变化以及陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征相似^[16-17]。杨文等^[31]对亚热带丘陵小流域研究表明土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）和全磷（TP）平均含量分别为13.09、1.50和0.51 g kg⁻¹，这与本研究中草地封育12年的结果（12.88、1.41和0.66 g kg⁻¹）相似。土壤碳氮含量随封育年限变化差异较大，而土壤全磷含量变异较小。刘兴沼等^[18]研究发现，土壤碳氮不仅受土壤母质影响，还受枯落物分解及植物吸收利用的影响，因而空间变异性较大，而磷主要受土壤母质的影响，因而变异性较小。有研究发现，在短期

内，土壤全磷含量随环境的变化较小，保持相对稳定^[19]。此外，土壤碳氮在草地封育后的第2年迅速下降，之后缓慢回升，封育12年的碳氮含量仍然小于封育1年，之后逐渐增加，在封育20年和30年的样地上升达到了一个较大的、相对平稳的阶段，这一点与王俊明和张兴昌^[20]的研究结果相似。土壤C : N随着草地演替过程保持相对稳定，这符合化学计量学的基本原则，即有机物质的形成需要一定数量的氮和其他营养成分与其相应比率的碳^[21]。土壤C : P、N : P受有机碳和全氮含量的影响，故土壤C : P、N : P比与有机碳和全氮变化

规律基本一致。此外，作为判断限制生产力的养分因子指标N:P, Güsewell^[25]综合考察了2004年以前对N:P质量比的研究成果后提出，在土壤氮磷含量皆不太高或太低的条件下，将N:P<10和N:P>20作为评价植被生产力受N或者P限制的指标。本文土壤N:P的变化范围为1.80~3.03，平均值为2.44<10，表明研究区域的草地生产力主要是受N限制。这与李红林等^[30]研究结果一致，即塔里木盆地北缘阿拉尔垦区灌漠土、棕漠土、盐土和风沙土四种土壤类型中N:P、C:P较C:N变化范围大，土壤C、N、P计量比表明N是研究区主要的限制因素。最后，在封育初期，草地土壤碳氮含量封育12年均小于封育1年，表明草地封育初期生态环境并没有改善，而如何缩短这段时间需进一步研究。

3.2 不同封育年限对根系C、N、P及其化学计量比的影响

通常植物根系有极强的可塑性来适应生长环境的时空变异性以及养分供给的不均匀性，使植物体维持正常的生长能力和生理功能^[23]。植物器官的养分含量可以反映植物生长环境的土壤营养水平^[8]。本研究中，我们发现植物根系中的C元素含量随封育年限的增加逐渐升高，这一点与前人的研究一致^[22]。这是因为草地封育的时间越长，生物多样性越完善，植被群落结构也越复杂，植被的保水保土能力越强，从而土壤有机碳含量明显增加。根系中的N元素含量随封育年限的变化差异不显著，N元素含量(7.72 g kg⁻¹)明显小于全球植物根系N含量平均值(11.1 g kg⁻¹)，根系P含量(0.60 g kg⁻¹)较全球植物根系的P含量平均值(0.77 g kg⁻¹)也偏低^[8]。推测其可能原因是由于干旱少雨土壤环境下植物需要维持较低的元素含量以达到其高效的元素利用效率^[24-25]，这是植物在长期进化过程中对环境的一种适应。Han等^[27]对中国753种陆生植物叶片N、P的生态化学计量学特征的研究发现，中国植物叶片P含量(1.46 g kg⁻¹)也显著低于全球P含量平均值(1.77 g kg⁻¹)^[8]，并推断其可能是因为中国土壤的平均P含量较低。此外，在不同的草地封育年限下，植物根系中P元素变异性较N元素变异性大，其主要是因为有机体内N元素的内稳态系数较P元素的内稳态系数强，从而造成植物N元素随外界环境的变化变异性更小^[28]。随着封育年限的变化，土壤养分含量变化

表现出升高后降低再升高趋于平缓的过程，这和植被恢复过程中植被物种的变化有关，由一年生到多年生再到顶级群落。

不同封育年限根系C:N变异系数为28.07%，C:P变异系数为22.38%，N:P变异系数为22.79%。根系C:N变异系数最大，根系C:P和N:P变异系数相差甚微。有研究^[26]认为，根系的C:N比值在不同生态系统中差异很大，而N:P比值基本相似；不同发育阶段的不同树种对应组织的C:N比值差异也很大，而N:P比值也基本相似，即C:N比值变化较大，N:P比值较稳定。这与本研究的结果相似，根系C:N随着封育年限的增加变化差异较大，C:P、N:P随着封育年限的增加差异较小。

3.3 土壤和植物根系C、N、P及其化学计量比的关系

土壤是植物根系营养元素的主要来源之一，植物根系几乎所有的生理生化活动均在土壤中完成，并且土壤养分含量对植物根系元素含量有着重要的影响。通过分析植物根系与土壤C、N、P及其化学计量比之间的相关性发现，土壤养分含量中全磷对植物根系C元素呈极显著相关关系($p < 0.01$)，土壤有机碳、全氮对植物根系C元素和N:P呈显著相关关系($p < 0.05$)。土壤C:N、土壤C:P和根系C元素存在极显著正相关关系($p < 0.01$)。而根系C:N、P之间不存在显著相关关系，只有根系C:P和N:P之间存在显著正相关。张光明等^[3]研究认为，植物对养分的需求是一个复杂的过程，当自然植物群落受人为干扰甚少时，群落水平植物C:N:P化学计量特征主要受土壤和气候调控。本研究选取的宁夏云雾山草原植被，经过30年的草地封育，人为干扰甚少，研究结果显示植物根系的C:N:P化学计量特征受土壤的影响调控大于其自身的影响调控。但是本文未对气候条件的影响进行研究，因此探讨植物根系C:N:P化学计量特征受生物及非生物因素的影响未来需做进一步的研究。由于植物通过土壤无机氮、生物固氮等方式获取氮元素，途径较广且较为稳定，而磷元素主要通过风化的母岩中获取，且磷素扩散到土壤中的速率较低^[29]，因此使得土壤磷含量对植物根系C:N:P生态化学计量特征影响的显著性($p < 0.01$)大于土壤氮含量($p < 0.05$)。

4 结 论

云雾山草原植被经过30年的封育，土壤容重随着封育年限的增加逐渐减小；土壤碳氮含量随封育年限的增加变异较大，并在封育初期土壤碳氮含量先降后升，至封育20、30年保持相对平稳，全磷变异较小；该地区植被生长易受到土壤N含量的限制。植物根系中的C元素含量随封育年限的增加逐渐升高，N、P元素含量均小于全球植物根系N、P含量平均值，且植物根系中P元素含量变化较N元素大；根系C:N比值随着封育年限的增加变异性大，C:P、N:P随着封育年限的增加变异性较小。植物根系的C:N:P化学计量特征受土壤的影响调控大于其自身的影响调控，且土壤磷含量对植物根系C:N:P生态化学计量特征影响的显著性($p < 0.01$)大于土壤氮含量($p < 0.05$)。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biogeochemical stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 2010, 186: 593—608
- [3] 张光明, 韩兴国, 李凌浩.内蒙古草地生态系统维持机理. 北京: 中国农业大学出版社, 2012
Zhang G M, Han X G, Li L H. Mechanisms for maintaining Inner Mongolian grassland ecosystems (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2012
- [4] 杨惠敏, 王冬梅.草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展. 草业学报, 2011, 20 (2) : 244—252
Yang H M, Wang D M. Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environment factors (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20 (2) : 244—252
- [5] 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
- [6] Jiao F, Wen Z M, An S S, et al. Successional changes in soil stoichiometry after landabandonment in Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 249—254
- [7] 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
- [8] 洪江涛, 吴建波, 王小丹.藏北高寒草原紫花针茅根系碳氮磷生态化学计量学特征. 山地学报, 2014, 32 (4) : 467—474
Hong J T, Wu J B, Wang X D. Root C:N:P stoichiometry of *Stipa pururea* in Alpine Steppe on the Northern Tibet (In Chinese). *Mountain Research*, 2014, 32 (4) : 467—474
- [9] Conrad M K, Tischew S. Grassland restoration in practice: Do we achieve the targets? A case study from Saxony-Anhalt: Germany. *Ecological Engineering*, 2011, 37 (8) : 1149—1157
- [10] Peltzer D A, Wardle D A, Allison V J, et al. Understanding ecosystem retrogression. *Ecological Monographs*, 2010, 80 (4) : 509—529
- [11] Yuan Z, Chen H Y. A global analysis of fine root production as affected by soil nitrogen and phosphorus. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, 279 (1743) : 3796—3802
- [12] 史利江, 郑丽波, 梅雪英, 等. 上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征. 应用生态学报, 2010, 21 (9) : 2279—2287
Shi L J, Zheng L B, Mei X Y, et al. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under different land use types in Shanghai (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (9) : 2279—2287
- [13] 万昊, 刘卫国, 卫杰. 黄土高原植被演替对土壤碳库及 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响. 生态学杂志, 2015, 34 (1) : 100—105
Wan H, Liu W G, Wei J. Effects of vegetation succession on carbon stock and $\delta^{13}\text{C}$ in Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (1) : 100—105
- [14] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. 生态学报, 2007, 27 (2) : 603—612
Wei X R, Shao M A. The distribution of soil nutrients

- on sloping land in the gully region watershed on the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (2) : 603—612
- [15] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33 (15) : 4674—4682
Zhu Q L, Xing X Y, Zhang H. Soil Ecological stoichiometry under different vegetation area on the hilly-gully region (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (15) : 4674—4682
- [16] 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. *土壤学报*, 2013, 50 (4) : 818—825
Zhang X R, Ma L S, Chen Y N, et al. Ecological stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* forest soil in different latitudes of Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (4) : 818—825
- [17] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征. *自然资源学报*, 2015, 30 (5) : 870—879
Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 (5) : 870—879
- [18] 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). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34 (1) : 64—71
- [19] Lambers H, Raven J A, Shaver G R, et al. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23 (2) : 95—103
- [20] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化. *草业学报*, 2009, 18 (1) : 1—8
Wang J M, Zhang X C. Changes of carbon storage in vegetation and soil during different successional stages of rehabilitated grassland (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18 (1) : 1—8
- [21] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2002
- [22] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测. *地域研究与开发*, 2006, (3) : 94—99
Peng W Y, Zhang K L, Yang Q K. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of Loess Plateau (In Chinese). *Areal Research and Development*, 2006, (3) : 94—99
- [23] 汪洪, 高翔, 陈磊, 等. 硝态氮供应下植物侧根系生长发育的响应机制. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (4) : 1005—1011
Wang H, Gao X, Chen L, et al. The mechanisms underlying plant lateral root development in response to nitrate (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (4) : 1005—1011
- [24] Tilman D. *Resource competition and community structure*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1982
- [25] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164: 243—266
- [26] Vitousek P M. *Stoichiometry and flexibility in the Hawaiian model system*. Washington: Island Press, 2003
- [27] Han W, Fang J A, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168 (2) : 377—385
- [28] Yu Q, Elser J J, He N, et al. Stoichiometric homeostasis of vascular plants in the Inner Mongolia grassland. *Oecologia*, 2011, 166 (1) : 1—10
- [29] Chen Y, Han W, Tang L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus concentrations of woody plants differ in responses to climate, soil and plant growth form. *Ecography*, 2011, 36 (2) : 178—184
- [30] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征. *土壤学报*, 2015, 52 (6) : 1345—1355
Li H L, Gong L, Zhu M L, et al. Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6) : 1345—1355
- [31] 杨文, 周脚根, 王美慧, 等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性. *土壤学报*, 2015, 52 (6) : 1336—1344
Yang W, Zhou J G, Wang M H, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6) : 1336—1344

Ecological Stoichiometric Characteristics of Grassland Soils and Plant Roots Relative to Enclosure History on the Loess Plateau

ZHAO Xiaodan^{1, 3} ZENG Quanchao² AN Shaoshan^{1, 3†} FANG Ying² MA Rentian²

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, CAS and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

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

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objective】The knowledge about vegetation succession, is essential to vegetation restoration, especially in steppe regions on the Loess Plateau. Recently stoichiometry has been effectively used to illustrate plant community succession and vegetation restoration. Balance of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in plant has been a hotspot of the research on biogeochemical cycle and plant ecology. However, most of the studies have focused on nutrients in plant leaves, and few did on the elements in plant roots, let alone, on ecological stoichiometrical characteristics of the soils and plant roots in steppe regions under enclosure on the Loess Plateau, relative to enclosure history. 【Method】This paper explored ecological stoichiometrical characteristics of the soils and plant roots in grasslands different in enclosure history (1 a, 12 a, 20 a and 30 a) on the Yunwu mountain of Ningxia Province. The steppe region under study is located between 106°26'E and 106°30'E and between 35°59'N and 36°02'N. The Yunwu Mountain lies across the center of the Loess Plateau, with an altitude ranging from 1 000 to 1 800 m above sea level. The study area has a semi-arid climate, characterized by heavy seasonal rainfalls causing recurrent flooding and drought, with mean annual temperature being 5 °C and mean annual precipitation being 445 m. The typical natural vegetation of this region is grassland. Samples of the soils and plant roots in the region were collected and analyzed for organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP), and their stoichiometrical ratio and interrelationships, using the time-space substitution method, based on the principles of stoichiometry. 【Result】Result show that with the enclosure going on, soil bulk density decreased gradually, SOC and TN varied more significantly, while TP did less. In the early years of enclosure, SOC and TN declined first and then rose till the enclosure reached 20 or 30 years old, when they leveled off. Soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus varied in the range of 12.88 ~ 22.37, 1.41 ~ 2.48 and 0.66 ~ 0.74 in the 0 ~ 20 cm soil layer and in the range of 9.58 ~ 18.45, 1.09 ~ 2.12 and 0.58 ~ 0.70 in the 20 ~ 40 cm soil layer, respectively. Soil C : N, C : P and N : P ratio varied in the range of 9.04 ~ 9.63, 19.62 ~ 32.27 and 2.14 ~ 3.37, respectively, in the 0 ~ 20 cm soil layer and in the range of 8.68 ~ 9.22, 15.74 ~ 26.32 and 1.80 ~ 3.03, respectively, in the 20 ~ 40 cm soil layer. Soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus were significantly correlated with each other. C, N and P concentration in the roots varied in the range of 357.6 to 381.4 g kg⁻¹, 7.35 to 8.18 g kg⁻¹ and 0.54 to 0.70 g kg⁻¹, respectively. In the root, C concentrations increased gradually with enclosure going on, whereas N and P concentrations were lower than the world's average. C : N, C : P and N : P ratio in the root varied in the range of 44.52 ~ 59.02, 574.7 ~ 793.9 and 10.87 ~ 15.14, respectively, during the period of enclosure, showing that C : N varied more drastically, while C : P and N : P did less. Ecological stoichiometric characteristics of C : N : P in plant roots were more affected by soil than by the root per se.

Soil TP affected the ecological stoichiometrical characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in plant roots ($p < 0.01$) more significantly than soil TN did ($p < 0.05$). Besides, the vegetation in this region tended to be restrained by soil N concentration after the grassland was enclosed. 【Conclusion】 The study on effects of enclosure on C, N and P in the soil and plant root of the grassland, their ecological stoichiometric characteristics and interrelationships may provide some scientific bases for the study on material recycling in the grassland ecosystem and nutrient restraints in the vegetation ecosystem, and some scientific references for accurate evaluation of ecological benefits of the policies or strategies of “Grain for Green” and “Enclosure of grassland”.

Key words Yunwu Mountain; Enclosure history; Soil; Plant roots; Ecological stoichiometry; C, N, P

(责任编辑: 陈荣府)