

网络出版时间:2017-08-21 13:50

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.10.010

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170821.1350.020.html

黄土丘陵区不同土壤-微生物-植物系统生态化学 计量特征对肥力梯度的响应

冉宜凡¹,许明祥^{1,2},李彬彬¹,马露洋¹,张圣民¹

(1 西北农林科技大学 林学院,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】【目的】研究施肥对土壤-微生物-植物系统化学计量学特征的影响,探究土壤-微生物-植被系统的“内稳性”,为黄土高原植被恢复提供科学依据。【方法】基于长期试验(2004年开始),在2种植被恢复系统(自然恢复系统和人工恢复系统)中,设置3种肥力水平(无肥,不施肥;低肥,施用45 000 kg/hm²有机肥;高肥,施用105 000 kg/hm²有机肥),2015年9月采集2种植被恢复系统中不同处理的土样以及灌木优势种叶片(自然恢复系统中为沙棘,人工恢复系统中为柠条),分析不同土壤肥力水平下2种土壤-微生物-植物系统碳、氮、磷化学计量比值特征及其相关关系。【结果】在2种植被恢复系统中,随着肥力水平的升高,土壤有机碳、微生物量碳、微生物量磷含量均明显提高;土壤、微生物量及植物叶片C/N总体增加,微生物及植物叶片N/P明显减小。相对于无肥处理,高肥处理下沙棘和柠条群落土壤C/N、C/P、N/P的变化幅度分别为40%,49%,7%和12%,27%,13%;微生物量C/N、C/P、N/P的变化幅度分别为80%,14%,50%和36%,9%,34%;叶片C/N、C/P、N/P的变化幅度分别为10%,23%,14%和40%,9%,31%。相对于自然植被恢复系统,在人工恢复系统中土壤养分与优势灌木叶片化学计量比的相关关系更强。【结论】在坡地侵蚀环境下施肥,可一定程度上提高了土壤肥力水平,改变土壤-微生物-植物系统生态化学计量特征,进而可能改变土壤-微生物-植物系统的物质循环,影响土壤质量演变和植被演替进程。在植被恢复过程中,人工植被恢复系统比自然植被恢复系统能更快建立土壤-叶片养分互馈关联。

【关键词】土壤微生物;植物系统;优势群落;化学计量学;肥力水平;黄土丘陵区

【中图分类号】S154.4

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2017)10-0077-08

Response of ecological stoichiometry characteristics of different soil-microorganism-plant systems to different fertility levels in the Loess hilly region

RAN Yifan¹, XU Mingxiang^{1,2}, LI Binbin¹, MA Luyang¹, ZHANG Shengmin¹

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:【Objective】The impact of fertilization on stoichiometry and internal stability characteristics of soil-microorganism-plant system was explored to provide basis for vegetation restoration on the Loess Plateau. 【Method】Based on a long-term experiment since 2004, three fertility levels (no fertilizer; low fertilizer, 45 000 kg/hm²; and high fertilizer, 105 000 kg/hm²) were set up in two vegetation restoration systems (natural restoration system and artificial restoration system). Soil and dominant shrub species samples were collected in September 2015. The dominant shrub species was *Hippophae rhamnoides* Linn. in

【收稿日期】2016-09-08

【基金项目】国家科技基础性工作专项“黄土高原主要生态系统资源分布与生源要素”(2014FY210100)

【作者简介】冉宜凡(1991—),女,陕西汉中,人,硕士,主要从事土壤植被互动效应研究。E-mail:fsxmb33@163.com

【通信作者】许明祥(1972—),男,陕西吴起人,副研究员,主要从事侵蚀环境土壤质量演变、调控以及土壤植被互动效应研究。E-mail:fisherwanglx@163.com

natural restoration system and *Caragana intermedia* in artificial restoration system. Carbon, nitrogen, phosphorus stoichiometry characteristics and the relationship within two soil-microorganism-plant systems were studied. 【Result】 In the two vegetation restoration systems, there was significant increase in contents of soil organic carbon, microbial biomass carbon and microbial biomass phosphorus with increase of soil fertility level. C/N ratios in soil, microbial biomass and leaf were increased while N/P ratios in microbial biomass and leaf were decreased significantly. After high fertilizer treatment, the changes of soil C/N, C/P, and N/P ratios were 40%, 49%, and 7% in *Hippophae rhamnoides* Linn. community and 12%, 27%, and 13% in *Caragana intermedia* community. The changes of microbial biomass C/N, C/P, and N/P ratios were 80%, 14%, 50% and 36%, 9%, 34%, while that of leaf C/N, C/P, and N/P ratios were 10%, 23%, 14% and 40%, 9%, 31%, respectively. Compared with natural restoration system, there was a stronger relationship between soil nutrients and dominant shrub leaf stoichiometry in artificial restoration system. 【Conclusion】 Stoichiometry characteristics of soil-microorganism-plant system can be changed by improving soil fertility through fertilization on slope land, then the matter cycling in soil-microorganism-plant system may be altered followed by evolution of soil quality and the vegetation succession. Compared with natural vegetation restoration system, the artificial vegetation restoration system can establish a link between soil and plant nutrient more quickly in vegetation restoration.

Key words: soil microbial; plant system; dominant community; stoichiometry; fertility levels; Loess hilly region

生态化学计量学是一种用来估计特定元素的相对数量关系是如何影响生态系统中营养元素循环的思路,能够在元素水平上统一生物系统基本化学元素(碳、氮、磷)循环及生态系统能量平衡^[1]。元素间化学计量关系是生态系统功能的核心,是联结食物网及其生物地球化学过程的内在纽带^[2]。在土壤-植被系统中,微生物的分解作用是联结土壤养分循环与植物营养过程的纽带,其对于养分的矿化、固存强烈影响着土壤肥力^[3],土壤中的有机质及植物残留物反过来也会影响微生物的分解速率,导致养分有效性的反馈^[2],而养分有效性的变化则可以通过植物化学计量比的改变反映出来^[4]。因此,可以利用生态化学计量学的思路来研究土壤生态系统各种化学元素的耦合关系^[1]。

生态化学计量学特征因研究尺度、生境、植物类型等环境与非环境因素的差异而改变,不同生态系统养分限制的生态化学计量学标准存在差异^[5]。在全球气候变化背景下,生物地球循环的响应规律和陆地植物适应对策受到广泛关注,基于陆地生态系统的生态化学计量学研究内容除了测定生态化学计量比外,还综合比较不同系统、功能群和物种间的计量学特征,并探究计量学特征与环境因子间的耦合关系^[6]。随着人们对生态系统中土壤、植物及其枯落物的化学计量特征认识的逐步深入,驱动土壤食物网元素循环的异养微生物群落化学计量学特征亦

倍受关注^[2]。

陆地植物计量学变化范围受植物自身体型、功能组群及营养供给的影响^[7]。植物本身具有调整体内营养元素化学计量比值的能力^[8],大量研究证实,环境因子的变化能显著影响陆地植物 C、N、P 生态化学计量学特征^[9-11]。如土壤肥力的改变(氮磷有效性改变)可能会影响植物地上地下生物量的分配,进而影响其化学计量比^[12];植物叶片化学计量比不仅受单一元素影响,也受元素互动的的影响^[4];另外,植物对于不同肥力(营养)梯度的响应因其生长限制元素的种类不同而有差异^[4]。微生物化学计量比对于养分添加的响应程度因微生物的生存环境本底养分含量差异而不同^[13],也因微生物对营养物质的吸收、储存而改变^[14-16]。

近年来,在农业系统中以制定营养元素含量的合适范围,从而为生产实践提供依据的农作物、果蔬营养诊断应用性研究较为多见^[17-20],但在自然系统诸如土壤-植物系统内,关于碳氮磷营养元素耦合及其比值表征的生态系统可持续性的研究仍不够系统。特别是当外界环境条件改变时(如营养添加),其植物-微生物系统化学计量比对于因营养添加而改变了的土壤养分环境到底会如何响应,尤其是在黄土高原这一特殊环境下,土壤-微生物-植物系统的化学计量学特征是如何响应环境营养梯度的尚未见报道。本研究拟通过控制试验,明确 2 种恢复系

统下土壤、优势植物及微生物量碳氮磷化学计量特征对肥力梯度的响应,探究土壤-微生物-植被系统“内稳性”,以期从生态化学计量角度为黄土高原植被恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院安塞水土保持综合试验站(108°51′—109°26′E,36°31′—37°19′N)山地试验小区进行。研究区位于陕北黄土高原中部,具有典型的梁峁状丘陵沟壑区特征,该地日照丰富,干湿分明,年均日照时数为 2 397.3 h^[21],年平均气温 8.8℃,年均降水量 500 mm,年蒸发量大于 1 463 mm,降水季节分配不均;属森林草原地带向风沙草原带的过渡区,南有森林植被,北有沙生植物,中为灌丛草原^[22]。土壤类型主要是在黄土母质上发育而成的黄绵土,侵蚀主要是细沟和浅沟侵蚀,平均侵蚀模数达 2 180 t/(km²·年)^[23]。随着大规模退耕还林还草工程的实施,此地经历了从猪毛蒿(*Salsola collina* Pall)-狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)群落、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)群落及达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)-铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)-沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)群落到狼牙刺(*Sophora viciifolia*)群落的演替过

程^[24]。

1.2 试验设计

试验及小区建设开始于 2004 年,小区面积 20 m×4 m,坡度 24°,坡向东偏南 10°,坡位梁峁上部,研究区缓坡地立体示意图见图 1。在研究区 2 种植被恢复系统内(自然恢复系统,不提供草本和灌木植物种源;人工恢复系统,人为地提供草本和灌木植物的种源),依据当地施肥习惯分别设 3 个肥力水平:无肥(NF),不施肥;低肥(LF),施用 45 000 kg/hm² 有机肥;高肥(HF),施用 105 000 kg/hm² 有机肥。施用的有机肥为腐熟羊粪,其有机质含量为 250 g/kg,全氮含量为 6.5 g/kg,全磷含量为 4.7 g/kg。试验采用完全组合设计,共 6 个处理,每处理 3 次重复,随机排列。施肥后 3 个肥力水平下土壤有机质含量平均值分别为 5.5,6.7,6.7 g/kg。人工恢复所提供的草、灌种源为本土不同植被演替阶段的优势种,包括茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、猪毛蒿(*Salsola collina* Pall)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、柠条(*Caragana intermedia*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)。



图 1 黄土丘陵区缓坡地立体示意图

Fig. 1 Three dimensional graph of gentle slop in Loess hilly region

目前,自然恢复系统小区草本植物主要有二裂委陵菜(*Potentilla bifurca* Linn.)、苦苣菜(*Sonchus oleraceus* L.)、铁杆蒿、茵陈蒿等;灌木优势种为沙棘,其平均密度为 0.45 株/m²,平均高度为 1.5 m。人工恢复系统小区草本植物种类主要有猪毛蒿、芡蒿(*Artemisia giraldii* Pamp)、长芒草、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd) Novopokr)等;灌木优势种为柠条,其平均密度为 0.56 株/m²,平均高度为 1.45 m。

1.3 样品的采集与测定

于 2015 年 9 月采集土壤及植物样品。在各小区上、中、下 3 个坡位采集 0~20 cm 土层混合土样,4℃低温保鲜运回实验室。选取各样地内灌木优势种 3~4 株,分别于东、西、南、北 4 个方位采集 10~15 片生长状况良好的典型叶片得到叶片混合样品,

每一样品由被选定植物的新、老叶片按 1:1 质量比混合而成。

除去土壤样品中可见植物残体、石块及土壤动物等杂物,一部分土样自然风干后用于土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量的测定;部分新鲜土样过 2 mm 筛后,调节土壤含水量至饱和持水量的 50%,再将其置于广口瓶内,以保鲜膜封口,在 25℃条件下预培养 7 d 后进行微生物量 C、N、P 含量的测定^[25-27]。植物叶片在 105℃杀青 0.5 h 后,于 65℃烘干粉碎,过孔径 0.25 mm 筛制成待测样品。

土壤样品分析:有机碳含量用 K₂Cr₂O₇-浓硫酸外加热法^[28]测定,全氮含量用凯氏定氮法(Kjeltec 2300 全自动定氮仪)^[28]测定,全磷含量用 H₂SO₄-HClO₄法^[28]测定,微生物量碳含量用氯仿熏蒸一

0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提—TOC 法^[28]测定,微生物量氮含量用氯仿熏蒸—0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提—过硫酸钾氧化紫外分光光度法^[28]测定,微生物量磷含量用氯仿熏蒸—0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗显色法^[28]测定。

植物样品分析:叶片碳含量用 K₂Cr₂O₇-浓硫酸外加热法^[28]测定,叶片氮含量用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-凯式定氮法^[28]测定,叶片磷含量用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钼锑抗比色法^[28]测定,以上指标均为质量分数。

1.4 数据处理

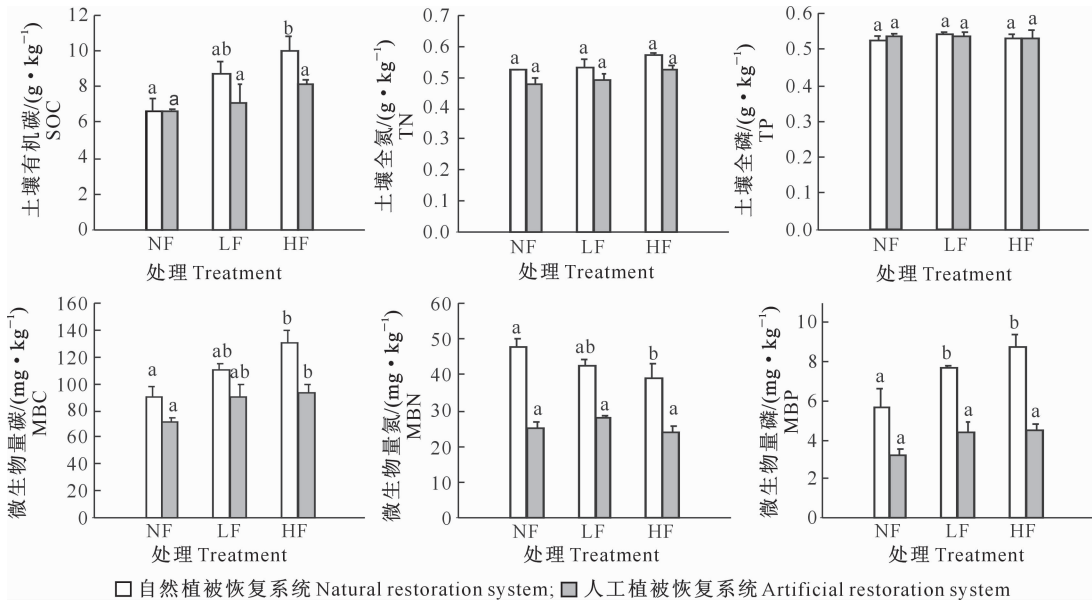
本研究中碳、氮、磷比值均采用各元素物质的量之比,运用 SPSS 18.0 对数据进行分析;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、LSD 多重比较检验不同肥力水平下的土壤、微生物、植物碳氮磷含量及其化学计量比的差异显著性($\alpha=0.05$);方差齐性检

验通过时,用 LSD 法进行多重比较;方差不齐时,则用 Tamhane’s T2 法进行多重比较。采用 Pearson 法对土壤-微生物-植物碳氮磷化学计量比进行相关性分析^[29-30];所有数据采用 SigmaPlot 12.5 做图。

2 结果与分析

2.1 黄土丘陵区土壤-微生物-植物系统碳氮磷含量特征

在 2 种恢复系统下,土壤有机碳、全氮含量随肥力水平的提升呈增加趋势,其中自然恢复系统土壤有机碳含量在无肥及高肥处理之间差异达到显著水平($P<0.05$),各肥力处理下土壤全氮含量差异不显著;随着肥力水平的提升,全磷含量无明显变化($P>0.05$)(图 2)。



图柱上标相同小写字母表示在同一系统下各肥力处理间差异不显著($P>0.05$), 标不同小写字母表示在同一系统下各肥力处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Same lowercase letters indicate insignificant differences among fertility treatments in same system($P>0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$). The same below.

图 2 黄土丘陵区不同肥力水平下 2 种植被恢复系统土壤及微生物量碳、氮、磷含量
Fig. 2 Contents of soil C, N, and P and MBC, MBN, MBP in two vegetation restoration systems under different fertility levels in the Loess hilly region

图 2 显示,2 种恢复系统下,微生物量碳、磷含量随着肥力水平的提升呈增加趋势,其中微生物量碳含量在无肥与高肥处理间差异显著($P<0.05$);在自然植被恢复系统下,低肥和高肥与无肥处理的微生物量磷含量具有显著性差异($P<0.05$);在人工植被恢复系统下微生物量磷含量在各肥力梯度间差异不显著($P>0.05$)。随着肥力水平的提升,自

然恢复系统下,沙棘群落土壤微生物量氮含量明显减少;在人工恢复系统中,柠条群落土壤微生物量氮含量无显著变化($P>0.05$)。

图 3 显示,2 种优势植物的叶片碳、氮、磷含量在各施肥处理间差异不显著($P>0.05$),沙棘叶片氮、磷含量以及柠条叶片碳含量均随着肥力水平的提升呈增加趋势;柠条叶片氮含量随肥力水平的提

升呈减小趋势。

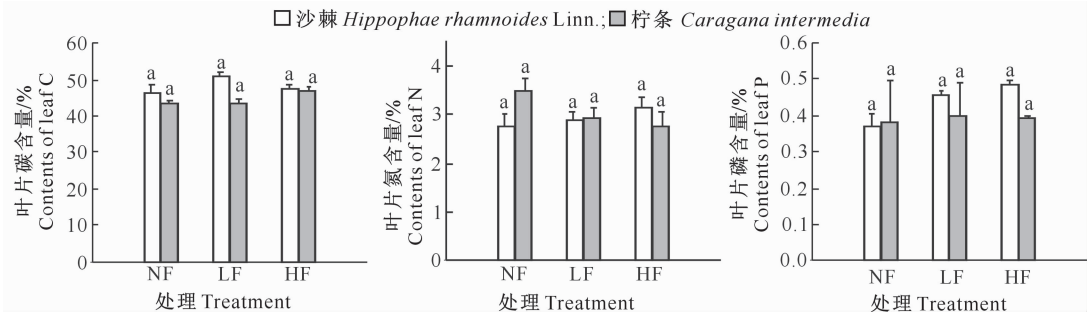


图 3 黄土丘陵区施肥对 2 种植被恢复系统中优势植物叶片碳、氮、磷含量的影响
Fig. 3 Effects of fertilization on C,N,and P contents of dominant plant leaves in two vegetation restoration systems in Loess hilly region

2.2 黄土丘陵区土壤-微生物-植物系统碳氮磷化学计量比特征

图 4 显示,在自然植被恢复系统和人工植被恢复系统下,土壤 C/N 分别为 14.6~20.4,16.2~18.2,平均值分别为 18.0,17.0;土壤 C/P 分别为 32.5~48.5,31.6~40.1,平均值分别为 40.8,35.1;土壤 N/P 分别为 2.2~2.4,2.0~2.2,平均值分别为 2.3,2.1。随着肥力水平的升高,2 种恢复系统下土壤 C/N、C/P 皆呈增高趋势,而 N/P 基本保持稳定。

图 4 还显示,在自然植被恢复系统和人工植被恢复系统下,土壤微生物量 C/N 分别为 2.2~4.0,3.8~4.6,平均值分别为 3.1,3.9;微生物量 C/P 分别为 37.2~44.4,53.3~58.6,平均值分别为 40.0,55.9;微生物量 N/P 分别为 9.9~20.0,11.7~17.7,平均值分别为 14.1,14.7。总体来看,随着肥力水平的升高,微生物量 C/N 明显增加,微生物量 N/P 明显降低,而微生物量 C/P 无显著变化($P>0.05$)。

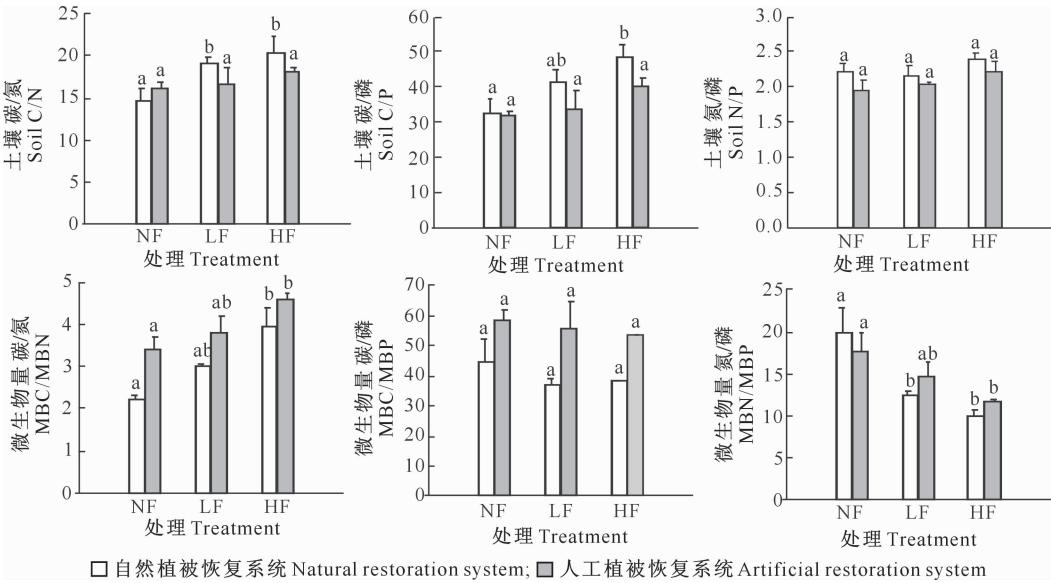


图 4 黄土丘陵区不同肥力水平下 2 种植被恢复系统土壤及微生物量碳、氮、磷化学计量特征
Fig. 4 Stoichiometry characteristics of soil C,N,and P and MBC,MBN,MBP in two vegetation restoration systems under different fertility levels in the Loess hilly region

黄土丘陵区施肥对 2 种植被恢复系统中优势植物叶片碳、氮、磷化学计量比的影响如图 5 所示。由图 5 可知,沙棘和柠条叶片 C/N 分别为 17.8~20.6,14.7~20.5,平均值分别为 19.4,17.6;叶片

C/P 分别为 253.2~330.7,310.0~339.3,平均值分别为 290.7,321.4;叶片 N/P 分别为 14.1~16.7,15.5~22.5,平均值分别为 15.0,18.5。随着肥力水平的升高,沙棘叶片 C/N、C/P、N/P 均无显

著变化;柠条叶片 C/N 明显升高,N/P 明显降低, C/P 无显著变化($P>0.05$)。

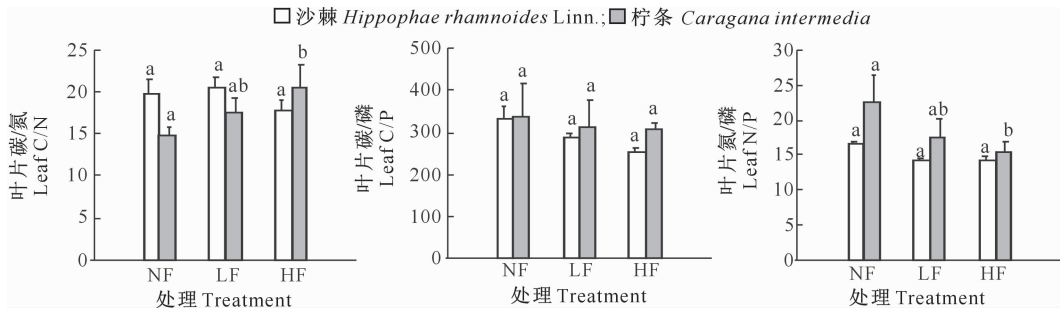


图 5 黄土丘陵区施肥对 2 种植被恢复系统中优势植物叶片碳、氮、磷化学计量比的影响
Fig. 5 Effects of fertilization on C,N,and P stoichiometry characteristics of dominant plant leaves in two vegetation restoration systems in Loess hilly region

2.3 黄土丘陵区土壤-微生物-植物系统碳氮磷化学计量比的相关性分析

表 1 显示,在 2 种植被恢复系统中,土壤 C/N 分别与土壤 C/P、微生物量 C/N 呈极显著正相关,土壤 C/P 分别与土壤 N/ P、微生物量 C/N 呈显著或极显著正相关;微生物量 C/N 与微生物量 N/ P 呈极显著负相关;微生物量 C/P 与微生物量 N/P 呈极显著正相关;叶片 C/N 与叶片 C/ P 呈极显著正相关。

表 1 还显示,自然恢复系统下,土壤微生物量 C/P、N/P 均与土壤 C/N、C/P 具有极显著负相关关系,除了微生物量 C/N、C/P、N/P,土壤与植物叶片化学计量比间无显著相关关系;而人工恢复系统下,土壤微生物量 C/P、N/P 均与土壤 C/N、C/P 无显著相关关系,微生物量 C/N、N/P 及土壤 C/N、C/P、N/P 均与植物叶片化学计量比具有极显著相关关系。

表 1 2 种土壤-微生物-植物系统下碳氮磷化学计量比的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficients of C:N:P stoichiometry ratio in two soil-microbial-plant systems

系统名称 System name	优势灌木群落 Dominant shrub community	指标 Index	A	B	C	D	E	F	G	H	I
人工植被恢复系统 Artificial restoration system	柠条 <i>Caragana intermedia</i>	A	1.000	0.809**	0.203	0.690**	0.040	−0.464	0.830**	0.237	−0.318
		B		1.000	0.740**	0.766**	0.087	−0.429	0.662**	0.085	−0.626**
		C			1.000	0.476	0.112	−0.162	−0.032	−0.678**	−0.782**
		D				1.000	0.059	−0.706**	0.373	0.703**	−0.303
		E					1.000	0.642**	0.476	0.212	−0.070
		F						1.000	−0.226	−0.625**	0.129
		G							1.000	0.872**	−0.980**
		H								1.000	−0.759**
		I									1.000
自然植被恢复系统 Natural restoration system	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn.	A	1.000	0.935**	0.204	0.660**	−0.625**	−0.655**	−0.129	−0.470	−0.467
		B		1.000	0.534*	0.72**	−0.601**	−0.633**	−0.169	−0.415	−0.362
		C			1.000	0.389	−0.199	−0.155	−0.014	0.074	0.070
		D				1.000	−0.802**	−0.887**	−0.525*	−0.860**	−0.108
		E					1.000	0.875**	0.145	0.656**	0.271
		F						1.000	0.469	0.917**	0.410
		G							1.000	0.771**	−0.254
		H								1.000	0.417
		I									1.000

注:A. 土壤 C/N;B. 土壤 C/P;C. 土壤 N/P;D. 微生物量 C/N;E. 微生物量 C/P;F. 微生物量 N/P;G. 叶片 C/N;H. 叶片 C/P;I. 叶片 N/P。
* 表示相关性达显著水平($P<0.05$), ** 表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。
Note: A. Soil C/N;B. Soil C/P;C. Soil N/P;D. MBC/MBN;E. MBC/MBP;F. MBN/MBP;G. Leaf C/N;H. Leaf C/ P;I. Leaf N/ P. * and ** indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

3 讨 论

在土壤-植被系统中,土壤养分可直接影响植物对养分的吸收和利用,改变植物养分含量、化学计量比及其生态策略^[6]。对于黄土高原土壤-植被生态系统的可持续性而言,土壤养分生态化学计量特征和土壤养分含量同等重要;同时,优势种植物是长期适应环境不断进化的结果,其体内营养元素的化学计量特征在一定程度上能反映植物对特定环境中养分的利用状况及其自身代谢能力,同时也能反映土壤中养分的供应状况^[31]。通过研究优势植物在不同肥力水平下的土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征,揭示土壤-微生物-植物系统元素调节机制,可从生态化学计量学角度为黄土高原土壤改良、植被恢复提供科学依据。

有研究指出,植物和土壤 C/N、C/P、N/P 可用于限制性养分及碳、氮、磷饱和状况诊断与预测^[32-33],但土壤 C/N、C/P、N/P 阈值指示的土壤限制性元素及其指示作用的有效范围等都需要进一步研究^[1]。在农业生态系统中,化学计量学广泛应用于农作物及果蔬、叶片的营养诊断^[17-20],然而因自然生态系统研究不具有农业生产应用研究的紧迫性,关于判定自然生态系统适宜的碳、氮、磷化学计量比的研究并不多见,这方面的研究仍有待探索。

本研究中,施肥在一定程度上改变了土壤-微生物-植物系统的碳、氮、磷含量及其化学计量比。与无肥处理相比,施肥总体能够明显增加土壤、微生物量及植物 C/N,反映了施肥在改善土壤环境的同时提升了植物叶片的干物质合成效率。其中,自然恢复系统下,沙棘叶片 C/N、C/P、N/P 均值分别为 19.4, 290.7, 15.0;人工恢复系统下,柠条叶片 C/N、C/P、N/P 的均值分别为 17.6, 321.4, 18.5;这与黄土高原植物叶片 C/N(21.2), C/P (312) 及 N/P 值(15.4)相当^[34]。在自然恢复系统的沙棘群落下,相对于无肥处理,高肥处理土壤 C/N、C/P、N/P 的变化幅度分别为 40%, 49%, 7%;微生物量 C/N、C/P、N/P 的变化幅度分别为 80%, 14%, 50%;叶片 C/N、C/P、N/P 的变化幅度分别为 10%, 23% 和 14%, 可见施肥后微生物量 C/N、N/P 对于施肥干扰的响应最为强烈,其次是土壤 C/N、C/P, 而叶片化学计量比对施肥干扰的响应变化并不剧烈。在人工恢复系统的柠条群落下,相对于无肥处理,高肥处理的土壤 C/N、C/P、N/P 的变化幅度分别为 12%, 27%, 13%;微生物量 C/N、C/P、N/P 的变化幅度分别为 36%, 9%, 34%;叶片

C/N、C/P、N/P 的变化幅度分别为 40%, 9% 和 31%, 可见在柠条优势群落中,微生物量 C/N、N/P 及叶片 C/N、N/P 对于施肥干扰的响应皆较为剧烈。

由以上研究可知,在 2 种不同的土壤-微生物-植物恢复系统下,微生物对于施肥的响应皆较为剧烈,这与前人得出的结论基本一致,即微生物作为土壤系统中负责养分循环及周转的纽带,对于环境变化的响应最为敏感^[35]。虽然在 2 种植被恢复系统下,微生物皆强烈响应施肥引起的环境变化,但沙棘叶片化学计量比(主要是 C/N、N/P)对于环境变化的响应没有柠条剧烈,可能是植物种类差异导致的养分利用策略及反馈方式不同所致。由本研究中人工恢复系统的化学计量学特征变化体现出的环境敏感性,柠条叶片与土壤碳氮磷化学计量比的密切相关关系可以看出,在植被恢复过程中,人工恢复系统比自然植被恢复系统能较快建立土壤-叶片养分互馈关联,从而加速了植被恢复。

总之,在坡地侵蚀环境下施肥,在一定程度上提高土壤肥力水平,能改变土壤-微生物-植物系统生态化学计量特征,进而可能改变土壤-微生物-植物系统的物质循环,影响土壤质量演变和植被演替进程。

[参考文献]

- [1] 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): 3938-3944.
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3938-3944.
- [2] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. Ecological Monographs, 2015, 85(2): 133-155.
- [3] Fan H B, Wu J P, Liu W F, et al. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. Plant & Soil, 2015, 392(1/2): 127-138.
- [4] Zheng B Y, Namyong K, Han W X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus supply on growth rate, leaf stoichiometry, and nutrient resorption of *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant & Soil, 2015, 388(1/2): 147-155.
- [5] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.
Zeng D P, Jiang L L, Zeng C S, et al. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [6] 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 [J]. 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 environ-

- mental factors [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 244-252.
- [7] Borer E T, Lind E M, Ogdahl E J, et al. Food-web composition and plant diversity control foliar nutrient content and stoichiometry [J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(6): 1432-1441.
- [8] 朴河春, 刘丛强, 朱书法, 等. 贵州石灰岩和砂岩地区 C_4 和 C_3 植物营养元素的化学计量对 N/P 比值波动的影响 [J]. *第四纪研究*, 2005, 25(5): 552-560.
- Piao H C, Liu C Q, Zhu S F, et al. Variations of C_4 and C_3 plant N:P ratios influenced by nutrient stoichiometry in limestone and sandstone areas of Guizhou [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(5): 552-560.
- [9] Hofmockel K S, Gallet-Budynek A, McCarthy H R, et al. Sources of increased N uptake in forest trees growing under elevated CO_2 : results of a large-scale ^{15}N study [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3338-3350.
- [10] Stevens C J, Du Prè C, Dorland E, et al. The impact of nitrogen deposition on acid grasslands in the Atlantic region of Europe [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2243-2250.
- [11] Zhang S B, Zhang J L, Slik J W F, et al. Leaf element concentrations of terrestrial plants across China are influenced by taxonomy and the environment [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(8): 809-818.
- [12] Palo F D, Fornara D. Soil fertility and the carbon:nutrient stoichiometry of herbaceous plant species [J]. *Ecosphere*, 2015, 6(12): 273.
- [13] Heuck C, Weig A, S Pohn M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 85: 119-129.
- [14] Wilkinson J F. Carbon and energy storage in bacteria [J]. *Journal of General Microbiology*, 1963, 32(32): 171-176.
- [15] Kornberg A. Inorganic poly phosphate: toward making a forgotten polymer unforgettable [J]. *Journal of Bacteriology*, 1995, 177(3): 491-496.
- [16] Wilson W A, Roach P J, Montero M, et al. Regulation of glycogen metabolism in yeast and bacteria [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2010, 34(6): 952-985.
- [17] 刘小勇, 王发林, 张 坤, 等. 两个苹果品种不同枝类叶营养含量年周期变化及营养诊断方法研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 481-489.
- Liu X Y, Wang F L, Zhang K, et al. Study on the annual variations of foliar nutrient contents from different branches and nutrition diagnosis methods of two apple cultivars [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 481-489.
- [18] 杨 慧, 曹红霞, 柳美玉, 等. 水氮耦合条件下番茄临界氮浓度模型的建立及氮素营养诊断 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1234-1242.
- Yang H, Cao H X, Liu M Y, et al. Simulation of critical nitrogen concentration and nitrogen nutrition index of tomato under different water and nitrogen conditions [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1234-1242.
- [19] 谢文龙, 李 健, 施 清, 等. 纽荷尔脐橙叶片矿质元素含量适宜值的研究 [J]. *园艺学报*, 2014, 41(6): 1069-1079.
- Xie W L, Li J, Shi Q, et al. Studies on the optimum parameters for mineral nutrition in Newhall Navel orange leaves [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(6): 1069-1079.
- [20] 安贵阳, 史联让, 杜志辉, 等. 陕西地区苹果叶营养元素标准范围的确定 [J]. *园艺学报*, 2004, 31(1): 81-83.
- An G Y, Shi L R, Du Z H, et al. Studies on the standard range of apple leaf nutritional elements in Shaanxi province [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(1): 81-83.
- [21] 朱会利, 杨改河, 韩新辉. 陕北安塞县水文要素变化特征分析 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(8): 178-184.
- Zhu H L, Yang G H, Han X H. Variation characteristics of hydrological features in Ansai county [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2011, 39(8): 178-184.
- [22] 张小燕, 杨改河, 陈 宏. 陕西安塞县农业地域资源优势及开发 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(6): 26-28.
- Zhang X Y, Yang G H, Chen H. Regional agriculture resource predominance and development in Ansai county of Shaanxi province [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2002, 30(6): 26-28.
- [23] 赵景波. 黄土的本质与形成模式 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 199-200.
- Zhao J B. The essence and formation model of the Loess [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 199-200.
- [24] 焦菊英, 张振国, 贾燕锋, 等. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类 [J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 2982-2994.
- Jiao J Y, Zhang Z G, Jia Y F, et al. Species composition and classification of natural vegetation in the abandoned lands of the hilly-gullied region of North Shaanxi province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 2982-2994.
- [25] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进 [J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 63-66.
- Lin Q M, Wu Y G, Liu H L. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 63-66.
- [26] 黄懿梅, 安韶山, 曲 东, 等. 两种测定土壤微生物量氮方法的比较初探 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 830-835.
- Huang Y M, An S S, Qu D, et al. Comparison between two methods of determination soil microbial biomass nitrogen [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 830-835.
- [27] 崔纪超, 毛艳玲, 杨智杰, 等. 土壤微生物量磷研究进展 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(4): 81-85.
- Cui J C, Mao Y L, Yang Z J, et al. Advances in soil microbial biomass phosphorus [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, 3(4): 81-85.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 5-300.
- Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 5-300.

[17] 许信旺,潘根兴,曹志红,等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素 [J]. 地理研究,2007,26(6):1077-1086.
Xu X W, Pan G X, Cao Z H, et al. A study on the influence of soil organic carbon density and its spatial distribution in Anhui province of China [J]. Geographical Research, 2007, 26(6):1077-1086.

[18] 赵锐锋,张丽华,赵海莉,等. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素 [J]. 地理科学,2013,33(3):363-370.
Zhao R F, Zhang L H, Zhao H L, et al. Distribution of soil organic carbon of wetlands in the middle reaches of the Heihe river and its influencing factors [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(3):363-370.

[19] Wissing L, Kolbl A, Vogelsang V, et al. Organic carbon accumulation in a 2000-year chronosequence of paddy soil evolution [J]. Catena, 2011, 87(3):376-385.

[20] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. 地球科学进展,2005,20(1):99-105.
Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1):99-105.

[21] 徐建明. 土壤质量指标与评价 [M]. 北京:科学出版社,2010:49-55.
Xu J M. Soil quality indicators and assessment [M]. Beijing: Science Press, 2010:49-55.

[22] 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节 [J]. 生态学报,1996,16(3):258-264.

Liang Y L. The adjustment of soil water and nitrogen phosphorus nutrition on root system growth of wheat and water use. [J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(3):258-264.

[23] Selhorst A, Lal R. Effects of climate and soil properties on US home lawn soil organic carbon concentration and pool [J]. Environmental Management, 2012, 50(6):1177-1192.

[24] Lu M, Zhou X H, Luo Y Q, et al. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 140(1/2):234-244.

[25] Fornara D A, Tilman D. Soil carbon sequestration in prairie grasslands increased by chronic nitrogen addition [J]. Ecology, 2012, 93(9):2030-2036.

[26] 李嵘,常瑞英. 土壤有机碳对外源氮添加的响应及其机制 [J]. 植物生态学报,2015,39(10):1012-1020.
Li R, Chang R Y. Effects of external nitrogen additions on soil organic carbon dynamics and the mechanism [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(10):1012-1020.

[27] 李林森,程淑兰,方华军,等. 氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响 [J]. 土壤学报,2015,52(1):183-193.
Li L S, Cheng S L, Fang H J, et al. Effect of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau. [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1):183-193.

(上接第 84 页)

[29] Li H, Li J, He Y L, et al. Changes in carbon, nutrients and stoichiometry relations under different soil depths, plant tissues and ages in black locust plantations [J]. Acta Physiol Plant, 2013, 35(10):2951-2964.

[30] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3):235-252.

[31] 徐沙,龚吉蕊,张梓榆,等. 不同利用方式下草地优势植物的生态化学计量特征 [J]. 草业学报,2014,23(6):45-53.
Xu S, Gong J R, Zhang Z Y, et al. The ecological stoichiometry of dominant species in different land uses type of grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6):45-53.

[32] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven J T A. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. Ecological Applications, 2003, 13(2):372-384.

[33] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3):523-534.

[34] 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 [J]. 自然科学进展,2006,16(8):965-972.
Zheng S X, Shanguan Z P. The spatial distribution pattern of plant leaf nutrient in Loess Plateau [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8):965-972.

[35] 赵彤,闫浩,蒋跃利,等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 [J]. 生态学报,2013,33(18):5615-5622.
Zhao T, Yan H, Jiang Y L, et al. Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18):5615-5622.