荒漠草原中不同密度人工柠条灌丛土壤化学计量特征

杨 阳，刘秉儒，杨新国，韩丛丛

（宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021）

摘 要：为了揭示人工灌草结合的生态系统土壤内部 C，N，P 平衡和循环过程，以荒漠草原为对照（CK），研究了相同林龄不同密度（高密度 HD、中密度 MD、低密度 LD）人工柠条灌丛土壤化学计量特征。结果表明，柠条灌丛 0—100 cm 土层平均有机碳（SOC）、全氮（TN），全磷（TP）和氮磷比（N/P）随密度的增加呈上升趋势，碳氮比（C/N），碳磷比（C/P）呈降低趋势，其中 TP 的空间变异性较高；垂直方向 SOC，C/N 和 C/P 随土层深度的增加呈单峰曲线，TN，TP 和 N/P 在 0—40 cm 土层呈锐减趋势，40 cm 土层以下缓慢降低并趋于稳定；0—40 cm 土层 TN 和 TP 含量占总含量的 61.82%和 55.56%，可作为密度变化对人工柠条灌丛土壤养分的敏感指标；相关分析结果发现，人工柠条灌丛土壤 N 和 P 含量呈极显著正相关（$p<0.01$），二者均与 C/N 呈极显著的负相关（$p<0.01$），说明柠条对土壤中 N 和 P 两种元素需求相一致。

关键词：荒漠草原；人工柠条灌丛；密度；土壤化学计量特征

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2014)05-0067-07 **中图分类号**：S153.6

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.019

Soil Stoichiometry Characteristics of Artificial *Caragana Korshinskii* Shrubs with Different Density in Desert Steppe

YANG Yang, LIU Bing-ru, YANG Xin-guo, HAN Cong-cong

(*Key Lab of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: Taking the natural desert steppe as CK, soil stoichiometry characteristics of artificial *Caragana korshinskii* shrubs with different density (HD, MD, LD) of the same forest age were investigated to reveal soil C, N, P balance and internal circulation in artificial shrub-grass ecological system. The results showed that with the increase of the density, soil organic carbon(SOC), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP) and ratio of nitrogen to phosphorus(N/P) in 0—100 cm presented an increase trend, while the ratio of carbon to nitrogen(C/N) and carbon to phoshorus(C/P) presented a decrease trend, and the variation coefficient of TP was higher than other soil stoichiometry; Vertical direction SOC, C/N and C/P showed unimodal curve with the increase of soil depth, while TN, TP and N/P showed a sharply decrease trend in 0—40 cm soil layer with the increase of soil depth, but in 40—100 cm soil layer showed a slow decrease and tended to be stable. In 0—40 cm soil, TN and TP accounted for 61.82% and 55.56% of total content, and the content of TN and TP soil could be used as artificial *C. microphylla* shrubs sensitive index of soil nutrients; Correlation analysis showed that N content was positively linearly correlated with P content ($p<0.01$), and both was significantly negative correlated with C/N ($p<0.01$), and indicates consistent demand of N and P content in soil for *C. microphylla* shrubs.

Keywords: **desert steppe; artificial *Caragana korshinskii* shrubs; density; soil stoichiometry characteristics**

生态化学计量学综合了生态学和化学计量学的基本原理探究，分析生态系统多种元素的循环与平衡[1-3]，是研究 C，N，P 等元素在生态系统中耦合关系的综合方法[4-6]，近年来成为当今生态学研究的重要手段。生态系统化学计量学能够在区域尺度揭示植物化学计量学分布格局及其驱动因素[6-9]，对土壤中养分的可获性、有效性和 C，N，P 养分的循环和平衡机制研究至关重要[5,10-11]。目前关于土壤化学计量

收稿日期：2013-11-26 修回日期：2014-01-17

资助项目：国家重点基础研究发展计划项目前期研究专项“荒漠草原农牧系统稳定性与维持机理研究”（2012CB723206）

作者简介：杨阳（1988—），男（汉族），湖北省襄阳市人，硕士研究生，研究方向为恢复生态学。E-mail：yangyangnature@163.com。

通信作者：刘秉儒（1971—），男（汉族），甘肃省庆阳市人，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事生态恢复理论与技术研究。E-mail：bingru.liu@163.com。

学特征的研究大部分集中于草地、森林[4,10,7,12-13]，西北干旱和半干旱的荒漠草原，在人工引入灌木林后，其土壤化学计量学特征尚不明确。从土壤化学计量学角度揭示人工灌草结合的生态系统土壤内部C，N，P平衡和循环过程[6,9]，能为中国荒漠草地生态系统土壤C，N，P区域性变化、平衡和循环研究提供基础数据。

宁夏东部荒漠草原是中国典型的生态脆弱区，柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)因蒸腾速率低，抗逆性和适应性强等特点已经被广泛用于遏制草地退化[14-15]。引入柠条灌丛后可以提高土壤养分[16]。也有许多学者对荒漠草原区柠条灌丛的土壤水分、土壤演变规律及不同生长年限的养分特征等进行了深入研究[14,16-18]。蒋齐等[19]以土壤结构、水分、养分、植被等作为评价指标指出干旱风沙区人工柠条林营造的适宜密度为1 665或2 490丛/hm^2，但柠条灌丛不同密度人工会影响到土壤养分和化学计量特征[12]。目前还尚未见到不同密度人工柠条灌丛土壤化学计量的相关报告。因此，本试验以封育状态下荒漠草原相同立地条件的人工柠条灌丛为研究对象，拟系统开展不同密度的柠条灌丛土壤化学计量特征研究，以揭示荒漠草原区土壤C，N，P平衡和循环，为预测土壤有机质分解速率、养分限制性等研究提供参考[11,20]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘的盐池县典型荒漠草原区，属干中温带半干旱区、欧亚草原区、中部草原区的过度地带，是典型的鄂尔多斯台地，具有毛乌素沙地的典型气候特征，属于温带大陆性季风气候。年均温度7.6 ℃，年积温2 944.9 ℃，无霜期138 d，干燥度3.1，年均风速2.8 m/s，每年5 m/s以上的扬沙达323次，年平均降雨量在180～300 mm，主要集中7—9月，约占全年的60%以上，年蒸发量在1 221.9～2 086.5 mm。该区土壤类型主要是沙化灰钙土，土壤质地多为轻壤土、沙壤土和风沙土，结构松散，肥力较低。

研究区有人工柠条林地大约1.33×10^4 hm^2，营造人工柠条灌丛的带间距分别为1.5 m(高密度，HD)，3 m(中密度，MD)，6 m(低密度，LD)3种模式，对应种植密度为4 530丛/hm^2，3 670丛/hm^2，2 560丛/hm^2。与柠条灌丛的伴生种为白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、冰芦草(*Agropyron mongolicum*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、中华小苦荬(*Ixeridium chinense*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、阿尔泰紫菀(*Heteropappus altaicus*)、拐抽鸦葱(*Scorzonera divaricata*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及样品采集 在研究区以自然状况下栽植25 a封育人工柠条灌丛为研究对象(排除柠条灌丛生长年限对本实验的影响)，于2012年9月上旬在相同立地条件下选取上述3种不同密度柠条灌丛和与其邻近的天然荒漠草原(CK)样地，重复取样3次，4种样地每个重复样点垂直方向分为0—10，10—20，20—40，40—60，60—80，80—100 cm，采取五点取样法取混合土样，同时在取土样地附近挖剖面取相应土层的环刀土用以测容重。

1.2.2 测定方法 将野外采集的土样风干后，剔除＞2 mm的砾石，并使其全部通过2 mm土壤筛，然后挑去其中的根系。取少量在105 ℃条件下烘干至恒重，计算其土壤含水率；取少量利用Retsch S100球磨机粉碎，并通过100目土壤筛用于测量土壤养分各项指标。采用电极电位法测pH值，P4多功能测定仪测土壤电导率，重铬酸钾氧化外加热法测土壤有机碳含量，NaOH碱溶—钼锑抗比色法测定全磷，半微量凯氏定氮法测全氮[21]。

采用Excel 2003进行统计处理和图表绘制，SPSS 17.00软件对数据进行分析，采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和LSD法显著性分析，Pearson相关系数分析土壤化学计量与土壤养分及理化因子相关性。

2 结果与分析

2.1 不同深度土层SOC，TN和TP含量特征

如表1所示，4种样地SOC垂直分布规律均表现为先上升后下降趋势。MD和LD柠条灌丛SOC最高值在40—60 cm土层，CK和HD柠条灌丛SOC最高值在20—40 cm土层。4种样地SOC均在80—100 cm土层最低，HD柠条灌丛表层SOC含量受枯落物影响较大，出现明显的“表聚性”，受根系垂直分布的影响SOC随土层深度的增加其下降趋势也逐渐减小。0—40 cm土层SOC含量大小依次为：HD＞MD＞LD；40—60 cm土层SOC大小依次为：LD＞MD＞HD＞CK。10—20 cm土层中草地(CK)的SOC明显高于3种柠条灌丛，40 cm土层以下3种柠条灌丛SOC均明显高于草地，初步表明了柠条灌丛对SOC含量增加效应集中在40 cm土层以下，而0—20 cm土层柠条灌丛并没有出现增加效应。

表 1　不同密度柠条灌丛不同土层深度 SOC 含量

项目	各土层 SOC 含量/(g·kg^{-1})					
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
HD	4.79±1.14a	4.78±0.46ab	6.00±0.43a	4.52±0.12b	4.21±0.80a	3.76±0.99a
MD	3.85±0.22a	4.16±0.30bc	5.69±0.96b	5.95±0.54a	4.83±1.05a	3.24±0.35ab
LD	2.84±0.68c	3.85±0.10bc	6.32±0.22a	6.71±1.23a	4.56±0.86a	2.81±0.30ab
CK	3.76±0.98b	5.34±0.60a	5.84±0.53a	3.47±0.12c	3.25±0.56b	2.54±0.43b

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

由表 2 和表 3 可知,随土层深度的增加 4 种样地 0—100 cm 土层 TN,TP 含量逐渐降低,均以表层含量最高,80—100 cm 土层最低,并在 0—40 cm 土层锐减,40—100 cm 土层缓慢降低并逐步趋于稳定。3 种不同密度的柠条灌丛 TN,TP 含量差异并不显著,但均高于草地对照。

相同土层 TN,TP 含量均表现为:HD>MD>LD>CK,局部出现波动性。

表 2　不同密度柠条灌丛不同土层深度 TN 含量

项目	各土层 TN 含量/(g·kg^{-1})					
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
HD	0.83±0.15a	0.72±0.19a	0.62±0.07a	0.54±0.18a	0.50±0.10a	0.30±0.17a
MD	0.71±0.12ab	0.64±0.23a	0.60±0.15a	0.56±0.07a	0.44±0.13a	0.29±0.11a
LD	0.62±0.09ab	0.56±0.20ab	0.46±0.09b	0.36±0.12b	0.29±0.06b	0.22±0.08ab
CK	0.50±0.03b	0.42±0.08b	0.37±0.04b	0.28±0.16c	0.21±0.08b	0.20±0.04b

表 3　不同密度柠条灌丛不同土层深度 TP 含量

项目	各土层 TP 含量/(g·kg^{-1})					
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
HD	0.59±0.19a	0.57±0.21a	0.49±0.17a	0.48±0.10a	0.43±0.09a	0.41±0.08a
MD	0.55±0.09ab	0.54±0.16a	0.45±0.15a	0.45±0.16ab	0.43±0.12a	0.39±0.12a
LD	0.50±0.1 ab	0.45±0.13b	0.47±0.09a	0.44±0.06ab	0.43±0.06a	0.40±0.07a
CK	0.44±0.12b	0.43±0.08b	0.40±0.07a	0.37±0.04b	0.35±0.03a	0.34±0.04a

2.2　不同密度柠条灌丛 0－100 cm 土层平均 SOC,TN 和 TP 含量比较

从表 4 可以看出,随密度的变化,柠条灌丛土壤中的 C,N,P 含量具有一定的差异,4 种样地 TP 含量均达显著差异水平($p<0.05$),HD 和 MD 柠条灌丛土壤 SOC,TN 含量差异并不显著,但与 LD 柠条灌丛和 CK 达到显著差异($p<0.05$);4 种样地土壤 SOC,TN 和 TP 均呈表现出:HD>MD>LD>CK,与对照相比,柠条灌丛在密度增加的过程中,土壤 SOC 含量分别增加了 15.88%,14.39%,12.41%;TN 含量分别增加了 28.2%,17.02%,15.38%;TP 含量分别增加了 73.53%,58.82%,23.53%。

随柠条灌丛密度的增加,土壤 C/N,N/P 和 C/P 均呈现出规律性的变化(表 4)。3 种柠条灌丛 0—100 cm土层 C/N,C/P 逐渐降低,且均低于对照;N/P 随柠条灌丛密度的增加逐渐而增加,且均高于对照;HD 柠条灌丛 C/N,C/P 和 N/P 均与对照达到显著差异水平($p<0.05$),4 种样地 N/P 表现出:HD>MD>LD>CK 规律,C/N 和 C/P 表现出:HD<MD<LD<CK 规律。

表 4　4 种样地土壤 SOC,TN 和 TP 含量及 C/N,C/P 和 N/P 值

项目	SOC/(g·kg^{-1})	TN/(g·kg^{-1})	TP/(g·kg^{-1})	C/N	C/P	N/P
HD	4.67±1.13a	0.50±0.08a	0.59±0.19a	8.69±2.70b	9.48±1.84b	1.16±0.25a
MD	4.61±1.14a	0.47±0.07a	0.54±0.15b	9.04±2.36b	10.03±2.74a	1.14±0.24a
LD	4.53±1.68b	0.45±0.05b	0.42±0.16c	12.23±5.09a	10.14±3.53a	0.92±0.29b
CK	4.03±1.17c	0.39±0.04c	0.34±0.12d	12.91±3.06a	10.21±2.72a	0.82±0.23c

与对照相比，由 LD 到 HD 柠条灌丛，C/N 和 C/P 分别降低了 5.27%，29.98%，32.68%和 0.69%，1.76%，7.15%，N/P 分别增加了12.20%，39.02%，41.46%。随密度的增加其降低幅度逐渐减小并趋于平稳，以 HD 柠条灌丛 C/N 变化幅度较为明显，对其密度的变化表现较为敏感；3 种柠条灌丛 C/N，C/P 和 N/P 的变异系数分别为 20.17%，33.33%，26.53%。

2.3 不同深度土层化学计量比

图 1 显示了 4 种样地在不同土层土壤化学计量比。由图 1 可知，垂直方向随土层深度的增加 HD 和 MD 柠条灌丛 C/N 逐渐增加，但增加趋势减小，LD 柠条灌丛 C/N 呈先上升后降低趋势，在 20—40 cm 土层最高，40—100 cm 土层缓慢降低并趋于平稳，局部有所波动，对照 C/N 在 20—40 和 60—80 cm 土层出现 2 个波峰；CK 和 HD 柠条灌丛 C/P 在 20—40 cm土层达到最大，MD 和 LD 柠条灌丛在 40—60 cm土层达到最大，最大值以后其降低幅度逐渐减小并趋于平稳，对照 C/P 随土层深度呈单峰曲线；随土层深度增加 4 种样地 N/P 呈降低趋势，在 0—40 cm土层缓慢降低并趋于稳定，40 cm 土层以下锐减。综合来看，随柠条灌丛密度的增加土壤，C，N，P 含量也逐渐增加，土壤表层 C/N，C/P 和 N/P 呈下降趋势，深层 C/N，C/P 和 N/P 降低幅度并不明显。

2.4 柠条灌丛 N，P 含量与 C/N，C/P 的关系

综合 3 种不同密度人工柠条灌丛土壤中 SOC，TN 和 TP 含量作图分析，结果表明(图 1)，柠条灌丛土壤中 N 和 P 含量与 C/N 呈显著负相关性($p<0.05$)，随着 N，P 含量的增加 C/N 逐渐降低，直线方程能够反映两者之间的关系及变化趋势(图 2a 和 2b)；而柠条灌丛 N，P 含量与 C/P 均不呈现显著的线性相关($p>0.05$)(图 2c 和 2d)。相关性分析表明 N 含量与 P 含量呈显著的正线性相关($p<0.05$)，线性拟合系数 $R^2=0.668\ 2$，而 SOC 与 P 含量并没有显著的相关关系($p>0.05$)(图 2e 和 2f)。

2.5 柠条灌丛土壤因子与化学计量相关性

由表 5 可知，柠条灌丛 C/N 与 SOC 和电导率呈极显著的正相关($p<0.01$)，与土壤 TN，TP，容重和土壤含水量呈显著的负相关($p<0.01$)，与 pH 值没有相关性($p>0.05$)。C/P 与 SOC 呈极显著的正相关($p<0.01$)，与土壤容重和土壤含水量呈显著的负相关($p<0.01$)；N/P 与 TN，TP 和土壤含水量呈显著的正相关($p<0.05$)，与 SOC 呈显著的正相关($p<0.05$)，与 pH 值和电导率呈极显著的负相关($p<0.01$)，与土壤含水量没有相关性($p>0.05$)。综上所述，土壤理化因子和养分各指标对柠条灌丛土壤化学计量贡献均表现出一定的差异性，SOC 和土壤电导率对柠条灌丛土壤 C/N 贡献为正，TN，TP，容重和土壤含水量对 C/N 的贡献为负；SOC 对 C/P 贡献为正，容重和含水量对 C/P 贡献为负；SOC，TN，TP 和容重对 C/P 贡献为正，pH 值和电导率对 C/P 贡献为负。

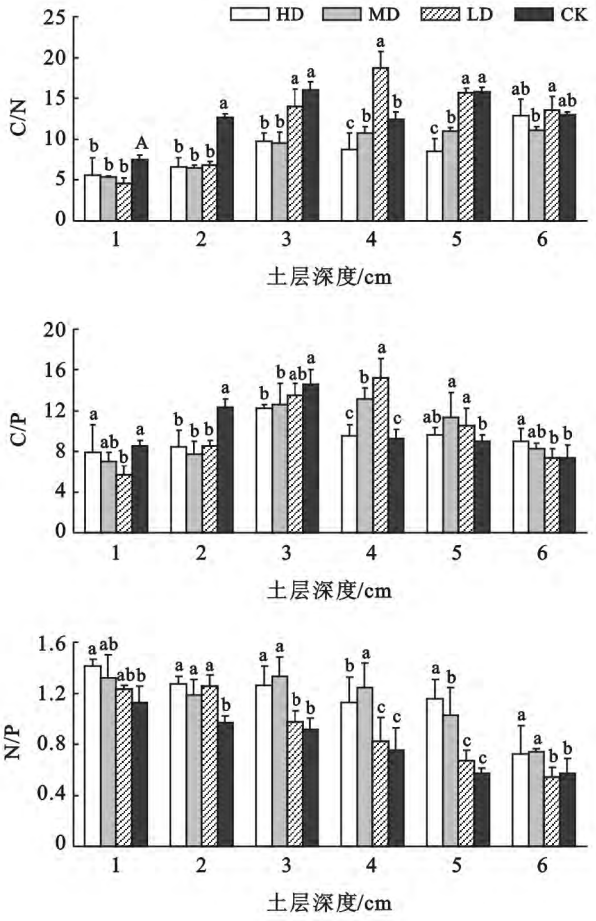


图 1 4 种样地不同土层 C，N，P 化学计量特征

注：横坐标刻度值 1，2，3，4，5，6 分别表示 0—10 cm，10—20 cm，20—40 cm，40—60 cm，60—80 cm，80—100 cm 深度处土层。

表 5 土壤因子与化学计量相关性

因 子	SOC	TN	TP	pH 值	电导率	容重	土壤含水量
C/N	0.528**	−0.776**	−0.563**	0.217	0.544**	−0.634**	−0.356**
C/P	0.873**	−0.105	−0.219	−0.070	0.202	−0.450**	−0.660**
N/P	0.279*	0.922**	0.548**	−0.381**	−0.546**	0.452**	0.069

注：**相关性在 0.01 水平上显著(双尾)；*相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

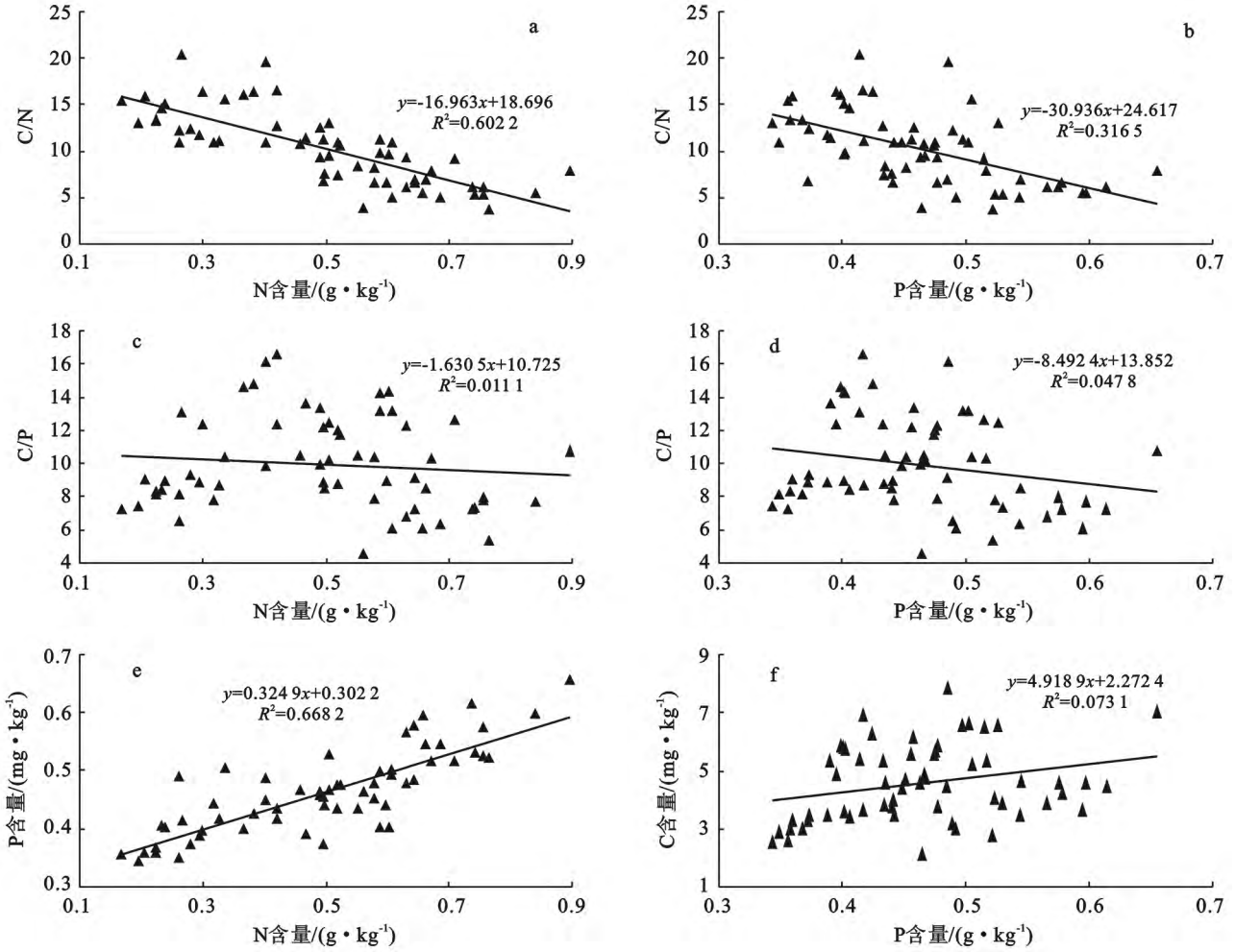


图 2　柠条灌丛 N,P 含量与 C/N,C/P 的关系

3　结 论

(1) 柠条灌丛垂直方向土壤 SOC,TN 和 TP 分布特征分析。表 1—3 的数据分析表明,柠条灌丛土壤 SOC 垂直分布规律呈单峰曲线,而 TN 和 TP 垂直分布规律表现为依次递减。柠条灌丛根系入土较深,根系营养吸收大部分来自于处于深层土壤中的有机质[12,14],因此 SOC 在其根系分布密集处含量最高并出现峰值,而不同密度柠条灌丛根系分布的空间异质性[12-14],会影响到土壤各层有机质的输入情况,导致不同密度柠条灌丛 SOC 垂直分布可能会出现一定的波动性;TN 和 TP 垂直分布规律随土层深度的增加表现为依次递减,柠条灌丛根系深度及其分泌物并没有明显改变 TN 和 TP 垂直分布特征,说明土壤微生物垂直方向的固氮作用和养分归还效应高于其根系分布及分泌物等影响[22-23],同时也说明了荒漠草原引入柠条灌丛后改变了土壤可利用碳源和氮源微生物群落的垂直分布[24-25],从而导致了 SOC 与 TN 和 TP 在土壤垂直方向上分布规律表现出一定的偏差。

在柠条灌丛密度增加的过程中,SOC,TN 和 TP 含量均表现为:HD>MD>LD>CK(表 4),SOC,TN 和 TP 含量随柠条灌丛密度的增加均有所增加,这与安韶山等[16]的研究结果一致。综合来看,以 HD 柠条灌丛增加效果最为明显,MD 和 LD 柠条灌丛次之,以 TP 的增加效果最为明显。因此,TP 含量对柠条灌丛密度的变化表现较为敏感,而 TP 的变异系数较高(24.03%),从而说明了在柠条灌丛密度增加的过程中,TP 比 SOC 和 TN 的空间变异性高,与张向茹等[4]、刘兴华等[11]、朱莲秋等[12]的研究结果相反。P 素是一种迁移率很低的沉积性矿物,在整个空间中分布较均匀,枯落物分解和根系分泌物对其影响较大[10,26-27],根系垂直分布和分泌物不同程度也干扰了磷的空间分布。相关性分析显示(图 2),柠条灌丛 TN 与 TP 呈极显著正相关,SOC 与 TP 没有显著的相关性,表明柠条灌丛对 TP 的增加效应一方面归于枯落物和根系分泌物[10,26-27],另一方面是依靠柠条(豆科固氮植物)灌丛根系的生长和固氮作用间接增加了 TP 含量,而这种间接增加作用一定程度上改变

了 P 素在土壤中的迁移率和空间分布，导致柠条灌丛土壤磷素的空间变异性较大。

(2) 柠条灌丛不同土层养分特征分析。柠条灌丛 0—100 cm 土壤中，SOC 随土层深度的增加呈先上升后降低趋势，TN 和 TP 呈降低趋势，二者的空间分布呈一致规律。很多研究证实土壤表层 SOC 和 TN 含量较高[4,10,12-13]，荒漠草原地表枯落物是表层土壤 SOC 和 TN 的主要来源，因此表层土壤 TN 和 TP 相对较高。本研究中 0—40 cm 土层 TN 和 TP 总含量的 61.82%和 55.56%，其平均降低的幅度分别为 25.30%和16.95%，40cm 土层以下缓慢降低并趋于稳定(表 2—3)，这与罗亚勇等[28]对高寒草甸的研究一致，初步表明 0—40 cm 土层 TN 和 TP 可作为人工柠条灌丛敏感的土壤养分指标；MD 和 LD 柠条灌丛土壤 SOC 含量最高值在 40—60 cm 土层；CK 和 HD 柠条林土壤 SOC 最高值在 20—40 cm 土层，主要是由于柠条灌丛地下生物量主要集中于微生物数量较多的 20—60 cm 土层[29-30]，枯落物中有机质的输入，土壤微生物的分解，地下生物量和根系垂直分布等综合作用造成了这种分布格局[10,26-30]。

(3) 柠条灌丛土壤 C，P，N 化学计量特征分析。碳氮磷比(C/N/P)是土壤有机质或其他成分中的碳、氮与隣素总质量的比值，是衡量土壤有机质组成和营养平衡的一个重要指标[31-32]，是确定土壤 C，N，P 平衡特征的重要参数[10,31-33]。本试验随柠条灌丛密度的增加，土壤 C/N 和 C/P 依次降低，而 N/P 依次增加，其中以 HD 柠条灌丛 N/P 变化幅度较大，对密度的变化表现较为敏感；3 种柠条灌丛 C/N 和 C/P 在表层较高(表 4)，这与前人[4,12,14,34]对土壤化学计量的研究结果一致。随柠条灌丛密度的增加，土壤 C，N，P 含量也逐渐增加，而表层 C/ N 和 C/P 值呈下降趋势，深层土壤 C/ N 和 C/P 的降低幅度不大，说明了在密度增加的过程中，表层 SOC 的增加导致了 N 素和 P 素的增加，在同等程度下表层 N 素和 P 素的增加比 C 素增加更为敏感，而深层土壤 C/ N 和 C/P 变化幅度并不明显，说明深层土壤中 N 素和 P 素的增加与 C 素增加保持一致。此外，由于柠条灌丛(固氮植物)结合了较多的固氮菌，固定了空气中部分 N 素，从而增加了土壤中的 N 素，同时也缓解了 N 素的流失[35-36]，使得土壤 C/N 较小，而这种固氮作用会随土层深度的增加逐渐减弱，因此，深层土壤 C/ N 和 C/P 变化幅度并不明显。根据土壤碳氮储量计算，全球土壤 C/N 平均值为 13.33，中国土壤 C/N 平均值在 10∶1～12∶1[37]，本试验 HD 和 MD 柠条灌丛 C/N 分别为 8.69，9.04，低于中国土壤 C/N 平均值，而 CK 和 LD 柠条灌丛 C/N 分别为 12.23，12.91，高于中国土壤 C/N 平均值，说明 HD 和 MD 柠条灌丛 N 含量较为丰富，也间接地体现了引入柠条灌丛后能够增加土壤 N 含量，并且随柠条灌丛密度的增加这种增加效果越明显，这与柠条根系的固氮作用有着密切的联系[35-36]。本试验柠条灌丛 C/N，C/P 和 N/P 的变异系数分别为20.17%，33.33%，26.53%，C/P 和 N/P 的空间异质性比 C/N 大，主要是由于本试验中 P 素自身的空间异质性较高造成的；有研究指出，N 和 P 的有效性是由土壤有机质的分解速率确定的，较低的 C/N 和 C/P 是氮和磷有效性的指标之一[3,10,38]。本研究中较低的 C/N 和 C/P 表明柠条灌丛更容易受土壤中 N 和 P 的限制，如果进一步研究其限制因素，还需对其叶片 N 和 P 含量进行综合研究，从而确定柠条是受 N 限制还是 P 限制。

(4) 柠条灌丛土壤养分与 C，P，N 化学计量分析。本研究柠条灌丛 SOC 与 TN 呈极显著的正相关，TN 与 TP 呈极显著的正相关，这一结果与前人的研究结果一致[12,39]。因此，柠条灌丛土壤 SOC 与 TN 呈极显著的正相关。柠条灌丛较高的生产力导致枯落物和植物残体均高于对照，不同密度柠条灌丛枯落物和植物残体分解合成的有机质均不同，因此，SOC，TN 和 TP 均表现出 HD＞MD＞LD＞CK，即柠条灌丛具有增加土壤养分的倾向；相关性分析表明，柠条灌丛土壤 N，P 与 C/N，C/P 相应的呈现显著的负相关($p<0.05$)，线性方程能更好地体现这种变化关系，且 N 含量与 P 含量呈显著性正相关($p<0.05$)，直线方程式较好地显示了这种变化趋势。体现了荒漠草原柠条灌丛对土壤中两种营养元素需求变化的一致性，这是柠条灌丛在荒漠草原能够稳定生长和繁殖的营养保障。

[参 考 文 献]

[1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000,3(6):540-550.

[2] Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, et al. Organism size, life history, and N∶P stoichiometry[J]. BioScience, 1996,46(9):674-684.

[3] 丁小慧，罗淑政，刘金巍，等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. 生态学报，2012,32(11):3467-3476.

[4] 张向茹，马露莎，陈亚南，等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报，2013,50(4):182-189.

[5] 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[J]. 植物生态学报，2010,34(1):2-6.

[6] He Jinsheng, Fang Jinyun, Wang Zhiheng, et al. Stoichiometry and largescale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. Oecologia, 2006,149(1):115-122.

[7] 任书杰,于贵瑞,姜春明,等. 中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J]. 应用生态学报,2012,23(3):581-586.

[8] 宋彦涛,周道玮,李强,等. 松嫩草地 80 种草本植物叶片氮磷化学计量特征[J]. 植物生态学报,2012,36(3):222-230.

[9] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J]. 环境科学,2010,31(8):1716-1725.

[10] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008,28(8):3937-3947.

[11] 刘兴华,陈为峰,段存国,等. 黄河三角洲未利用地开发对植物与土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):204-208.

[12] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2013,33(15):4674-4682.

[13] 张社奇,王国栋,张蕾. 黄土高原刺槐林对土壤养分时空分布的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(5):91-95.

[14] 宋乃平,杨新国,何秀珍,等. 荒漠草原人工柠条林重建的土壤养分效应[J]. 水土保持通报,2012,32(4):21-26.

[15] 王孟本,李洪建,柴宝峰. 柠条(*Caragana korshinskii*)的水分生理生态学特性[J]. 植物生态学报,1996,20(6):494-501.

[16] 安韶山,黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究[J]. 林业科学,2006,42(1):70-74.

[17] 刘任涛,杨新国,宋乃平,等. 荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律[J]. 水土保持学报,2012,26(4):108-112.

[18] 郭忠升,邵明安. 人工柠条林地土壤水分补给和消耗动态变化规律[J]. 水土保持学报,2007,21(2):119-123.

[19] 蒋齐,李生宝,潘占兵,等. 人工柠条灌木林营造对退化沙地改良效果的评价[J]. 水土保持学报,2006,20(4):23-27.

[20] Agren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in nature communities[J]. Annual Review Ecology, Evolution, and Systematics, 2008(39):153-170.

[21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[22] Edwards E J, McCaffery S, Evans J R. Phosphorus availability and elevated CO_2 affect biological nitrogen fixation and nutrient fluxes in a clover-dominated sward [J]. New Phytologist, 2006,169(1):157-167.

[23] Barnes M S, Forster J C, Keller J H. Electron energy distribution function measurements in a planar inductive oxygen radio frequency glow discharge[J]. Applied Physics Letters, 1993,62(21):2622-2624.

[24] 鲁顺保,郭晓敏,芮亦超,等. 澳大利亚亚热带不同森林土壤微生物群落对碳源的利用[J]. 生态学报,2012,32(9):2819-2826.

[25] Cabrera M L, Beare M H. Alkaline persulfate oxidation for determining total nitrogen in microbial biomass extracts [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(4):1007-1012.

[26] 邬畏,何兴东,周启星. 生态系统 N/P 化学计量特征研究进展[J]. 中国沙漠,2010,30(2):296-302.

[27] 程滨,赵永军,张文广,等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6):1628-1637.

[28] 罗亚勇,张宇,张静辉,等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志,2012,37(2):254-260.

[29] 张志山,李新荣,张景光,等. 用 Minirhizotrons 观测柠条根系生长动态[J]. 植物生态学报,2006,30(3):457-464.

[30] 张薇,胡跃高,黄国和,等. 西北黄土高原柠条种植区土壤微生物多样性分析[J]. 微生物学报,2007,47(5):751-756.

[31] 赵志红. 半干旱黄土区集雨措施和养分添加对苜蓿草地和封育植被生产力及土壤生态化学计量特征的影响[D]. 兰州:兰州大学,2010.

[32] 王晶苑,张心昱,温学发,等. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制[J]. 生态学报,2013,33(5):1337-1346.

[33] 项文化,黄志宏,闫文德,等. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J]. 生态学报, 2006, 26(7):2365-2372.

[34] Tian Hanqin, Chen Guangsheng, Zhang Chi, et al. Pattern and variation of C∶N∶P ratios in China's soil: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010,98(1):139-151.

[35] 赵志强. 鄂尔多斯几种沙生植物根际自身固氮菌的筛选及对杨柴接种效应研究[D]. 四川 雅安: 四川农业大学,2008.

[36] 宋成军,马克明,傅伯杰,等. 固氮类植物在陆地生态系统中的作用研究进展[J]. 生态学报,2009,29(2):869-877.

[37] 李早霞. 不同改良措施对退化羊草(*Leymus chinensis*)草原养分及其化学计量比的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2011.

[38] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns [J]. Advances in Ecological Research, 1999(30):1-67.

[39] 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[J]. 生态学报,2010,30(23):6581-6590.