

北方农牧交错带不同人工植被类型土壤碳氮磷及其化学计量特征——以武川县为例^①

吴叶礼¹, 闵雪¹, 赛硕¹, 杨之恒⁴, 邹旭⁴, 张英^{1,3}, 丁国栋^{1,2,3*}

(1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083; 3 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 4 北京林丰源生态环境规划设计院有限公司, 北京 100083)

摘要: 本研究以农牧交错带 4 种典型人工植被(樟子松、油松、杨树、柠条锦鸡儿)为研究对象, 以天然草地为对照, 探讨农牧交错带典型人工植被群落 0~100 cm 土层范围内土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征。结果表明: ①草地、柠条、杨树、樟子松和油松的表层(0~20 cm)土壤有机碳(SOC)含量分别为 7.72、7.16、4.16、15.59 和 15.84 g/kg, 全氮(TN)含量分别为 1.12、0.58、1.27、1.23 和 0.87 g/kg, 全磷(TP)含量分别为 0.24、0.20、0.31、0.14 和 0.25 g/kg, 均低于我国表层土壤 SOC、TN 和 TP 平均水平, 土壤肥力较低。②除杨树林外, 各人工植被类型下土壤 SOC 含量均大于草地, 表现为油松>樟子松>柠条>草地>杨树。杨树林的土壤 TN 和 TP 含量在各个土层深度均最高; 油松在 0~20 cm 土层中的土壤 TN 含量大于草地; 樟子松的土壤 TN 含量在 50~100 cm 土层中大于草地, 柠条最低且始终低于草地。除杨树林外, 其余人工植被的土壤 TP 含量均低于草地, 油松林最低。各个土层中, 不同人工植被的土壤 C:N 和 C:P 均大于草地, 总体上均表现为油松>樟子松>柠条>杨树>草地; 在 0~20 cm 土层中, 只有杨树林地的 N:P 大于草地, 而在 20~100 cm 中各植被的土壤 N:P 比草地高。③本研究中的土壤 C 与 N、P 的相关性不显著, 而土壤 N 与 P 呈极显著的正相关; SOC 对 C:N 和 C:P 的相关系数绝对值最大, 表明土壤 C:N 和 C:P 主要受 SOC 调控; 而 N:P 只与 TN 呈显著正相关, 表明 N:P 主要受 TN 调控。

关键词: 农牧交错带; 人工植被; 化学计量; N 限制

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

Soil C, N and P Contents and Their Stoichiometry Under Different Artificial Vegetation Types in Agro-pastoral Zone of Northern China: A Case Study of Wuchuan County

WU Yeli¹, MIN Xue¹, SAI Shuo¹, YANG Zhiheng⁴, ZOU Xu⁴, ZHANG Ying^{1,3}, DING Guodong^{1,2,3*}

(1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3 Key Laboratory of Soil and Water Conservation, State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4 Beijing Greensource Environment Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: This study investigated four typical artificial vegetation types (*Pinus sylvestris*, *Pinus tabulaeformis*, *Populus L.* and *Caragana korshinskii*) and grassland in the agro-pastoral transitional zone in order to explore the characteristics of soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and their stoichiometric ratios within the 0–100 cm soil layer. The results showed that: 1) Topsoil (0–20 cm) organic carbon (SOC) contents of grassland, *Caragana korshinskii*, *Populus L.*, *Pinus sylvestris*, *Pinus tabulaeformis* were 7.72, 7.16, 4.16, 15.59 and 15.84 g/kg, respectively; Total nitrogen (TN) contents were 1.12, 0.58, 1.27, 1.23 and 0.87 g/kg, respectively; Total phosphorus (TP) contents were 0.24, 0.20, 0.31, 0.14 and 0.25 g/kg, respectively. All were lower than those of the national average levels, indicating the lower soil fertility. 2) SOC was in an order of *Pinus tabulaeformis*>*Pinus sylvestris*>*Caragana korshinskii*>grassland>*Populus L.*, TN and TP in the poplar forest were highest among different soil depths. TN of *Pinus tabulaeformis* in the 0–20 cm layer was higher than that under grassland. TN in the 50–100 cm layer under *Pinus sylvestris* was higher than that under the grassland, while TN under *Caragana korshinskii* was lowest and lower than that under the

①基金项目: 呼和浩特市森林生态系统碳储量监测评价项目(150101-WWTCG-CS-20220003)资助。

* 通讯作者(dch1998@263.net)

作者简介: 吴叶礼(1998—), 女, 广西钦州人, 硕士研究生, 主要研究方向为荒漠化生态学。E-mail: Wuyeli_thus@163.com

grassland. Except for the *Populus* L. forest, TP under other artificial vegetation were lower than that under the grassland, with *Pinus tabulaeformis* being the lowest. In each soil layer, C : N and C : P ratios under different artificial vegetation were higher than those under the grassland, generally in an order of *Pinus tabulaeformis* > *Pinus sylvestris* > *Caragana korshinskii* > *Populus* L. > grassland. In the 0~20 cm layer, only N : P ratio of *Populus* L. exceeded that under the grassland, while in the 20~100 cm layer, N : P ratios of all vegetation was higher than that under grassland. 3) The correlation between soil C and N, P was not significant, while N and P showed a significant positive correlation. SOC had the highest correlation coefficient with C : N and C : P, indicating SOC was the primary regulator of C : N and C : P ratios, while N : P was only significantly correlated with TN, suggesting that N : P was mainly regulated by TN.

Key words: Agro-pastoral zone; Artificial vegetation; Stoichiometry; Nitrogen limitation

生态化学计量综合了生态学、生物学和化学的原理,揭示了多种元素特别是C、N和P之间的平衡^[1]。土壤是陆地生态系统的基础,在物质循环中发挥着不可替代的作用。土壤C、N和P含量及其化学计量比是反映土壤肥力和质量的基本参数^[2]。土壤C、N、P及其化学计量比受气候条件、土壤母质和土壤深度、人为干扰和植被类型等多种因素的影响。通常,生物过程(如植被枯枝落叶分解和根系分泌物)是土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)的主要来源。土壤全磷(TP)主要来源于岩石的机械风化,在不同土层下P含量和储量相对稳定^[3]。土壤C:N、C:P和N:P的变化可归因于植被或功能的变化,这些变化影响了植被枯落物产生的质量与数量以及有机物的降解程度^[4]。分析土壤C、N和P的化学计量,可以揭示C、N、P元素之间的相互作用和平衡约束,有助于了解植被与土壤的相互作用、养分循环^[5]。在我国干旱半干旱地区,人工植被恢复与建设是控制水土流失^[6]、改善土壤质量^[7]、提高植物多样性和生态系统稳定性^[8]的重要途径。Zhao等^[9]的研究发现黄土高原地区长期植树造林显著增加了土壤SOC、TN和TP含量和储量。温晨等^[10]的研究也发现黄土小流域人工恢复植被(柠条和山杏)土壤C、N、P含量及化学计量比均大于自然恢复植被(草地),在改善土壤养分方面有很大促进作用。晋西北风沙区的柠条人工林0~20 cm土层中的SOC、TN含量,土壤C:N、C:P和N:P均大于撂荒地对照组,且随着林龄的增加而增加,土壤TP含量无显著变化^[11]。

北方农牧交错带作为牲畜放牧到农业发展的过渡地带,是我国重要的生态安全屏障带^[12],具有十分重要的生态战略意义。但由于人们过度放牧、开垦耕地等活动,造成了北方农牧交错带林地草地退化、土地沙化、土地贫瘠化、风沙天气骤增等生态恶化问题^[13]。近年来,国家相继启动的退耕还林还草、退牧还草、京津源风沙治理、土地综合整治等生态修复治理重大工程极大地促进了北方农牧交错带

的生态可持续发展。研究土壤生态化学计量特征有助于了解植被建设过程中养分的循环和再分布规律,进而对植被恢复的合理调控进行科学建议。本研究以阴山北麓的农牧交错带4种典型人工植被群落——樟子松(*Pinus sylvestris*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、杨树(*Populus* L.)和柠条锦鸡儿(*Caragana intermediate*)为研究对象,以草地为对照,测定0~100 cm土层内的土壤C、N、P含量,比较分析不同人工植被类型下土壤C、N、P的垂直分布特征,探讨不同人工植被对土壤化学计量特征的影响,为促进北方农牧交错带的植被建设和生态恢复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武川县位于内蒙古高原的南部,阴山北麓,呼和浩特市北,地理坐标为110°31'E~111°53'E、40°47'N~41°23'N;属温带大陆性季风气候,日照充足,昼夜温差大,年均气温3.0 °C,无霜期124 d左右,冬季长,夏季短,年均降水量为200~400 mm。风沙活动频繁,主风向N、NW,年均风速4.5 m/s,年大风日数为65 d左右。土壤类型主要为栗钙土、灰褐土、石质土。主要植被类型为森林草原,部分地区为干旱草原。森林典型植物物种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、华北樟子松(*Pinus sylvestris*)、茶条槭(*Acer Ginnala*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等,灌木有柠条锦鸡儿(*Caragana intermediate*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)等,草本植物有委陵菜(*Potentilla chinensis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。

1.2 野外采样与分析

野外调查和采样工作于2022年7—8月植被生长旺盛期开展,根据研究区主要的人工植被类型,选取樟子松、油松、杨树、柠条4种人工植被,同时选取天然牧草地为研究对照,每个植被类型选择3个典型样地,样地基本信息如表1所示。在每个样地设置3

表1 采样点基本信息
Table 1 Basic information of sampling sites

植被类型	经度	纬度	海拔(m)	坡度(°)	植被盖度(%)
樟子松	111.16°E ~ 111.67°E	40.97°N ~ 41.19°N	1 608.6 ~ 1 803.1	7 ~ 15	85
油松	111.52°E ~ 111.76°E	40.94°N ~ 41.12°N	1 596 ~ 1 688	8 ~ 10	80
柠条锦鸡儿	110.58°E ~ 111.10°E	41.10°N ~ 41.29°N	1 705.1 ~ 1 810.7	1 ~ 5	65
杨树	111.10°E ~ 111.51°E	40.89°N ~ 41.92°N	1 464.1 ~ 1 719.6	3 ~ 33	85
草地	111.16°E ~ 111.69°E	40.95°N ~ 41.42°N	1 459 ~ 1 862	10 ~ 22	60

个 20 m × 20 m 的标准采样小区，在每个采样小区内沿对角线设置 3 个 1 m × 1 m 的草样方和 1 个 1 m 深的土壤剖面，采集记录草样方内的草本种类，计算植被盖度。对土壤剖面分 0 ~ 20、20 ~ 50、50 ~ 100 cm 取样，同一样地 3 个土壤剖面同土层土样充分混合后按四分法取样，然后放入塑封袋内作为该土层待测土样。用手持 GPS 测量地理坐标、坡向、坡度和海拔并记录在册。所有土壤样品在实验室自然风干，手动清除碎屑(小石块和未分解的植物根或枯落物)，研磨并通过 80 目的筛子，用于土壤化学性质分析。SOC 采用重铬酸钾氧化-硫酸铜滴定法测定，TN、TP 通过全自动化学分析仪测定。

1.3 数据处理与分析

对同一植被类型不同土层深度、同一土层深度不同植被类型的土壤化学计量特征进行单因素方差分析，利用 LSD 法进行多重检验，以探讨植被类型和土层深度对各项指标的影响。所有方差分析

之前，检验样本的正态性、方差齐性等前提条件，对不符合正态分布和方差齐性的数据进行对数转换使其满足正态性和方差齐性。用 Pearson 相关分析法分析土壤 SOC、TN 和 TP 及其化学计量比之间的关系。本文的 C : N、C : P 和 N : P 均采用质量比。数据统计与整理在 Excel 2021 进行，数据方差分析在 SPSS Statistics 26 进行，用 Qorigin 2023 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 不同人工植被土壤碳氮磷的垂直分布特征

通过双因素方差分析(表 2)表明，不同人工植被类型对土壤 C、N、P 及其化学计量比有显著影响，而土层深度及植被类型和土层深度的交互作用对土壤 C、N、P 及其化学计量比没有显著影响。所以下文就不同人工植被类型土壤 C、N、P 及其化学计量比进行分析和讨论。

表2 农牧交错带不同植被类型土壤 C、N、P 及其化学计量比的双因素方差分析

Table 2 Two-way analysis of variance for soil C, N, P and their stoichiometric ratios under different vegetation types in agricultural-pastoral transition zone

因素	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
植被类型	7.429 ^{**}	1.352	1.465	1.978	3.789 [*]	0.278
土层	0.345	0.082	0.629	0.175	0.019	0.607
植被类型×土层	0.299	0.188	0.081	0.459	0.083	0.997

注: 表中 *、** 分别表示影响达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。

如图 1A，除杨树林地外，各人工植被类型下 SOC 含量均大于草地，表现为松树>柠条>草地>杨树。柠条林地在各个土层内的土壤 TN 含量低于草地(图 1B)；杨树林地的土壤 TN 含量在各个土层深度中最高；其中，0 ~ 20 cm 土层中，杨树>油松>草地>樟子松>柠条，50 ~ 100 cm 土层中，杨树>樟子松>草地>油松>柠条。在各个土层中，只有杨树林的土壤 TP 含量高于草地，其余人工植被均低于草地，其中油松林最低(图 1C)。SOC、TN 和 TP 在各个土层之间无显著性差异，但是 SOC 含量除了柠条外，均呈随着土层深度的增加而降低的趋势，而 TN 和 TP 含量无显著变化。

2.2 不同人工植被土壤化学计量比的垂直分布特征

不同人工植被的土壤 C : N 均大于草地(图 1D)，在 0 ~ 20 cm 土层中，表现为樟子松>油松>柠条>杨树>草地；在 20 ~ 50 cm 土层中，表现为油松>樟子松>柠条>杨树>草地；在 50 ~ 100 cm 土层中，表现为油松>柠条>杨树>樟子松>草地。对于土壤 C : P(图 1E)，只有杨树林在各个土层中均低于草地，油松最高，尤其在 0 ~ 20 cm 显著高于除樟子松外其他植被($P<0.05$)。对于土壤 N : P(图 1F)，0 ~ 20 cm 土层只有油松林地高于草地，不同植被 N : P 表现为油松>草地>柠条>杨树>樟子松；20 ~ 50 cm 土层中表现为

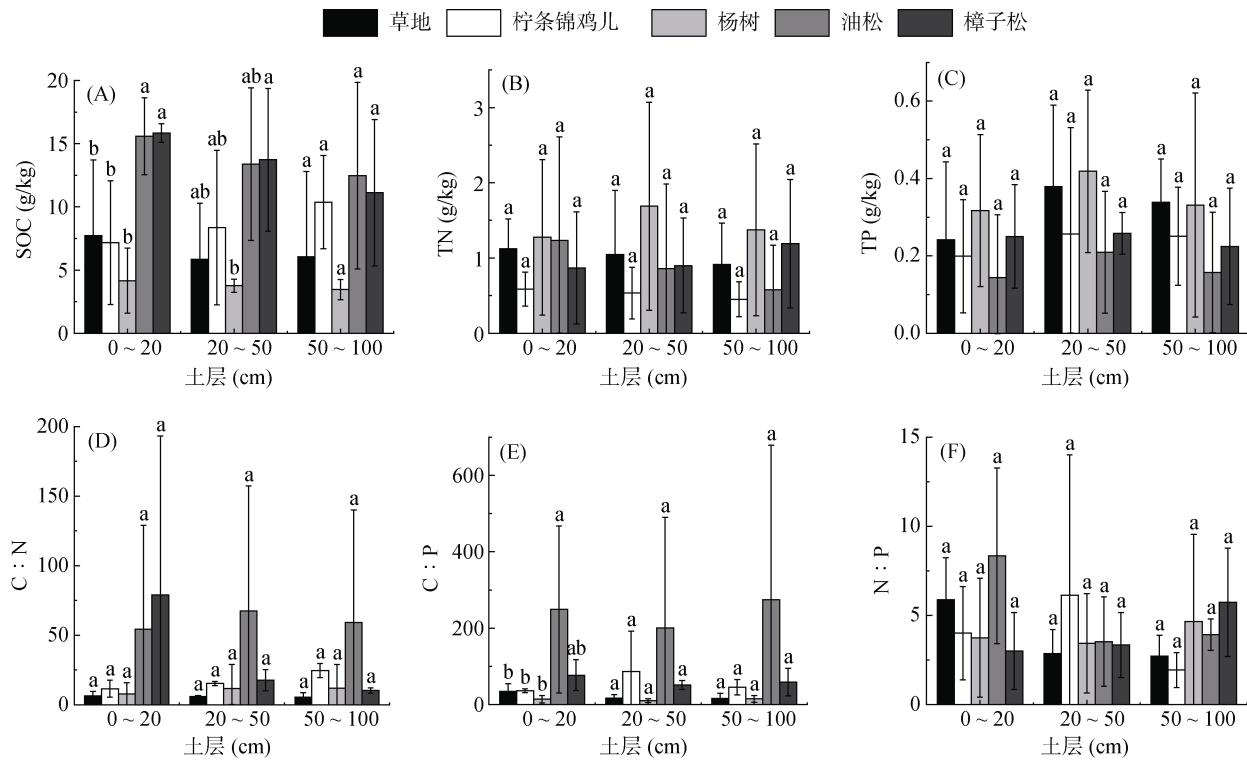
(图中小写字母不同表示同一土层不同植被类型之间差异显著($P<0.05$))

图 1 不同植被类型土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征

Fig. 1 Soil C, N and P contents and their stoichiometric ratios under different vegetation types

表 3 土壤 C、N、P 及其化学计量比之间的线性拟合关系
Table 3 Linear regressions among C, N, P and their stoichiometric ratios

	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
SOC	$y=0.0098x+0.8843$, $R^2=0.0052$	$y=-0.0015x^2+0.031x+0.161$, $R^2=0.0615$	$y=-0.0015x^2+0.031x+0.161$, $y=4.2217x-13.302$, $R^2=0.2739^{**}$	$y=4.2217x-13.302$, $R^2=0.2739^{**}$	$y=14.168x-52.079$, $R^2=0.3102^{**}$	$y=0.0262x+3.9777$, $R^2=0.0022$
TN		$y=0.1485x+0.1202$, $R^2=0.4754^{**}$		$y=-26.596x+51.756$, $R^2=0.2001^{**}$	$y=-62.325x+140$, $R^2=0.1105^*$	$y=1.3788x+2.8762$, $R^2=0.1122^*$
TP				$y=-26.596x+51.756$, $R^2=0.2001^*$	$y=-422.75x+191.27$, $R^2=0.2358^*$	$y=5.1719x+5.5909$, $R^2=0.0732$
C : N					$y=2.3888x+17.546$, $R^2=0.5737^{**}$	$y=-0.0141x+4.5839$, $R^2=0.0413$
C : P						$y=0.0038x+3.9163$, $R^2=0.0305$

注: 表中*、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。

柠条>樟子松、杨树、油松>草地; 50~100 cm 土层中, 表现为樟子松>杨树>油松>草地>柠条。

2.3 土壤碳氮磷及其化学计量比之间的相互关系

土壤 C、N、P 及其化学计量比之间的线性关系如表 3 所示, SOC 与 TN、TP 和 N : P 之间的线性拟合关系较差, Pearson 相关性也不显著; 而 SOC 与 C :

N 和 C : P 之间有较好的相关性(R^2 分别为 0.2739 和 0.3102, r 分别为 0.52 和 0.56, $P<0.01$)。TN 与 TP、C : N、C : P 和 N : P 均表现出较好的线性拟合关系, 其中 TN 与 TP 和 N : P 呈正相关, 与 C : N 和 C : P 呈负相关。TP 与 C : N 和 C : P 呈显著负相关($P<0.05$)。C : N 和 C : P 呈极显著正相关($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 不同人工植被类型下的土壤碳氮磷分布特征

土壤 C、N、P 及其化学计量比是反映土壤肥力和质量的基本参数。农牧交错带草地、柠条、杨树、樟子松和油松的表层(0~20 cm)SOC 含量分别为 7.72、7.16、4.16、15.59 和 15.84 g/kg, TN 含量分别为 1.12、0.58、1.27、1.23 和 0.87 g/kg, TP 含量分别为 0.24、0.20、0.31、0.14 和 0.25 g/kg, 均低于我国表层土壤 SOC(24.56 g/kg)、TN(1.88 g/kg)和 TP(0.78 g/kg)平均水平^[14]。这与 Chen 等人^[15]的研究结果一致, 该地区地处内陆风蚀和水蚀交错地带, 土壤侵蚀严重, 导致生物量生产力低, 土壤保水保肥能力差; 另一方面本研究区域的土壤多为栗钙土和石质土, 植被覆盖度和植被初级生产力相对较低, 养分贫瘠^[16]。不同植被类型的根系分泌物、残体和枯落物的数量和质量组成有所不同, 这就意味着植被类型可以通过影响这些过程来影响 SOC 和 TN 的含量, 从而影响 SOC 和 TN 的积累和分解^[17]。除杨树林地外, 各人工植被类型下 SOC 含量均大于草地, 表现为松树>柠条>草地>杨树。沙国良等人^[18]研究发现, 黄土高原丘陵区典型退耕还林人工树种的 SOC 含量为山杏>草地>沙棘>油松>油松山杏混交。杨树林地的土壤 TN 含量在各个土层深度中最高且大于草地, 樟子松和油松次之, 柠条最低。樟子松和油松林地因其高大的冠幅和较为复杂的群落结构, 具有较高的生物量产量和枯落物输入, 导致其较高的 SOC 含量和 TN 含量。而草地和柠条群落结构较为单一, 生物量和枯落物产量较低。与温晨等人^[10]的研究相反, 本研究中, 草地 SOC 含量在 0~20 cm 土层中较柠条高, 且 TN 含量在各个土层深度内均比柠条较高。一方面是草地植被生长速度较快, 且多数为固氮能力强的草本植物如黄耆、苜蓿等; 另一方面是草本植物高度虽低, 但其生长冠幅和根系匍匐遍布土壤表层^[19], 能对土壤起到一定的保护作用。杨树林具有最低的 SOC 含量, 而具有最高的 TN 和 TP 含量, 这可能跟该人工植被的管理措施如施加氮肥和磷肥有关。总体而言, 相比草地, 农牧交错带不同人工植被在一定程度上具有较高的土壤 SOC 和 TN 含量, 表明人工植被在一定程度提高了土壤肥力。黄土高原恢复 20~40 a 的刺槐和柠条土壤 SOC、TN 和 TP 含量也表现出均高于草地和坡耕地的现象^[20]。

SOC 含量除了柠条林外, 均呈随着土层深度的增加而降低的趋势, 呈现出“表聚现象”, TN 和 TP 含量无显著差异。SOC 主要来源于枯落物分解、根

系分泌物、动植物和微生物残体, 这些物质首先汇集在土壤表层, 然后随着时间逐渐进入土壤深层, 导致表层养分较高而深层较低^[21]。土壤 TN 主要来源于氮沉降和枯落物合成的有机质, 本研究结果表明植被类型和土层深度未能对土壤 TN 有显著影响, 可能还存在着其他的因素影响着土壤 TN 的分布。土壤 P 是一种沉积性矿物, 主要受成岩母质的影响, 主要来源于岩石风化, 不利于迁移, 因此一般在不同植被和不同土层中 P 含量和储量相对稳定^[22]。

3.2 农牧交错带不同人工植被群落化学计量比的特征

土壤 C:N 主要受输入的植被枯落物质量与数量的影响, 向土壤输入的枯落物越多, 微生物分解所需的基质就越充足, 从而有机质的分解速率就越快^[23]。土壤 C:N 影响 C:N 循环, 表示有机物的分解程度, 当 C:N>25 时, 表明土壤有机碳积累比分解快; 当 C:N 为 12~20 时, 表明土壤有机碳的矿化速率较快。本研究中草地、柠条、杨树的 C:N 均低于 25, 表明草地、柠条和杨树林的 SOC 分解速率大于积累速率, 以分解为主; 油松林的 C:N>25, 表明油松林 SOC 以积累为主; 樟子松林的 C:N 在 0~20 cm 高于 25, 而 20~100 cm 中均低于 25, 表明樟子松林 SOC 在表层积累而在深层土壤中分解。土壤 C:P 表明土壤有机磷的矿化能力, 受植被覆盖和恢复的影响^[24]。较高的 C:P 导致微生物分解有机质过程中产生 P 限制, 微生物与植被竞争土壤有机磷, 不利于植被的生长。本研究中草地、柠条、杨树林的土壤 C:P 均小于全国土壤 C:P 平均水平(52.7)^[14], 表现出极强的有机磷净矿化速率, 说明土壤 P 的有效性较高, 养分含量较为贫瘠。而油松林和樟子松林土壤 C:P 较其他植被高, 油松林的 C:P 高于全国 C:P 平均水平, 樟子松接近全国平均水平, 表明油松植被的生长受到一定的 P 限制。土壤 N:P 表征 N 饱和程度, 常用来衡量土壤 N 或 P 限制的阈值^[25]。本研究中柠条、杨树、樟子松 0~20 cm 土层的 N:P 均低于全国平均水平(5.2)^[14], 表明本研究区的人工植被的土壤 N 流失速率大于 P 的淋溶速率, 农牧交错带的植被生长过程中均可能存在严重的 N 限制。通过 Pearson 相关分析结果来看, SOC、TN 和 TP 均与 C:N 和 C:P 有显著性相关关系, 而从各相关系数的绝对值来看, SOC 对 C:N 和 C:P 的相关系数绝对值是最大的, 表明土壤 C:N 和 C:P 最主要受 SOC 调控。而 N:P 只与 TN 呈显著正相关, 表明 N:P 主要受 TN 调控。因此, 本研究区的土壤受到 C 和 N 的联合控制, 尤其是受到严重的 N 限制。

荒漠草原的土壤主要受 P 元素控制^[26]，科尔沁沙地土壤 N 缺乏严重^[27]。

总体而言，不同人工植被的土壤 C:N 和 C:P 均大于草地，在 20~100 cm 中的土壤 N:P 也比草地高，表明各人工植被尤其是油松和樟子松人工林的建设在一定程度上能够减缓 SOC 较快的分解速率和有机磷的净矿化速率，同时缓解土壤 N 限制，从而提高土壤 C、N 的积累能力。

4 结论

1) 研究区域各人工植被和草地的土壤 C、N、P 尤其是表层土壤均低于全国平均水平，土壤肥力较低。

2) 不同人工植被和草地土壤总体上受到 C 和 N 的控制，尤其是受到严重的 N 限制。

3) 各人工植被在一定程度上提高了土壤肥力和土壤 C、N 的积累能力。

参考文献：

- [1] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578–580.
- [2] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau Region of China[J]. *Geoderma*, 2013, 197/198: 67–78.
- [3] Luo W T, Dijkstra F A, Bai E, et al. A threshold reveals decoupled relationship of sulfur with carbon and nitrogen in soils across arid and semi-arid grasslands in Northern China[J]. *Biogeochemistry*, 2016, 127(1): 141–153.
- [4] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblunger K, Mooshammer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. *Ecological Monographs*, 2015, 85: 133–155.
- [5] 马剑, 冯起, 赵维俊, 等. 祁连山典型灌丛植物根系化学计量特征及其与土壤理化因子的关系[J]. 土壤, 2022, 54(2): 329–337.
- [6] 陆蕴青, 向伟, 李敏, 等. 黄土塬区土地利用变化对地表蒸散的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 89–98.
- [7] 李荣磊, 陈留美, 邵明安, 等. 黄土高原不同土质和植被类型下 Cl⁻运移特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1190–1201.
- [8] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of Northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert[J]. *Science China Life Sciences*, 2014, 57(5): 539–548.
- [9] Zhao F, Kang D, Han X H, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415–422.
- [10] 温晨, 杨智姣, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1824–1834.
- [11] Liu J, Gou Q, Wang G H, et al. Leaf and soil ecological stoichiometry of *Caragana korshinskii* in windy and sandy hilly region of northwest Shanxi, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(4): 546–558.
- [12] 姚正毅, 屈建军, 郑新民, 等. 北方农牧交错带风蚀复合区水土流失现状、分布特点及发展趋势[J]. 中国水土保持, 2008(12): 63–66.
- [13] 廖允成, 付增光, 贾志宽, 等. 中国北方农牧交错带土地沙漠化成因与防治技术[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 95–98.
- [14] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139–151.
- [15] Chen M Y, Yang X, Shao M A, et al. Changes in soil C-N-P stoichiometry after 20 years of typical artificial vegetation restoration in semiarid continental climate zones[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158380.
- [16] Lu J N, Feng S, Wang S K, et al. Patterns and driving mechanism of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry across northern China's desert-grassland transition zone[J]. *Catena*, 2023, 220: 106695.
- [17] 高日平, 赵沛义, 刘小月, 等. 长期施肥对农牧交错带栗钙土土壤理化性质及生物学特性的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(3): 552–560.
- [18] 沙国良, 陈宇轩, 魏天兴, 等. 黄土高原丘陵区典型退耕恢复植被土壤碳分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1265–1272.
- [19] Wang L L, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Soil C, N and P contents and their stoichiometry as affected by typical plant communities on steep gully slopes of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2022, 208: 105740.
- [20] 高德新, 张伟, 任成杰, 等. 黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3622–3630.
- [21] Chen Y, Li Y Q, Duan Y L, et al. Patterns and driving factors of soil ecological stoichiometry in typical ecologically fragile areas of China[J]. *Catena*, 2022, 219: 106628.
- [22] Su L, Du H, Zeng F P, et al. Soil and fine roots ecological stoichiometry in different vegetation restoration stages in a Karst Area, southwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 252: 109694.
- [23] Pang D B, Wang G Z, Li G J, et al. Ecological stoichiometric characteristics of two typical plantations in the Karst ecosystem of southwestern China[J]. *Forests*, 2018, 9: 56.
- [24] Hessen D O, Agren G I, Anderson T R, et al. Carbon sequestration in ecosystems: The role of stoichiometry[J]. *Ecology*, 2004, 85(5): 1179–1192.
- [25] Shen F F, Wu J P, Fan H B, et al. Soil N/P and C/P ratio regulate the responses of soil microbial community composition and enzyme activities in a long-term nitrogen loaded Chinese fir forest[J]. *Plant and Soil*, 2019, 436(1): 91–107.
- [26] 宋一凡, 卢亚静, 刘铁军, 等. 荒漠草原不同雨量带土壤-植物-微生物 C、N、P 及其化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4011–4023.
- [27] 曹雯婕, 李玉强, 陈银萍, 等. 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3312–3320.