

毛乌素沙地固沙林枯落物—土壤连续体生态化学计量特征

杨京¹, 张延文¹, 李灿², 拓卫卫¹, 王逸聪², 董文煊², 佟小刚^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 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)

摘要: 为揭示不同固沙林模式恢复过程中主要养分含量变化关系与差异特征。以榆林毛乌素沙区半固定沙地以及恢复 25~56 年的人工灌木和乔木林地对象, 测定和分析从枯落物层到腐殖质层, 再到矿质土层碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其化学计量比随恢复年限和连续体剖面的动态变化特征及相关关系。结果表明: 不同恢复年限 2 种林地 C、N、P 含量及其化学计量均表现为枯落物层>腐殖质层>矿质土层。但随林地恢复年限延长, 2 种林地枯落物、腐殖质及矿质土层 C 含量均显著增加, 到恢复 56 年时, 分别比半固定沙地平均增加 1.76、35.70、6.45 倍; P 含量在腐殖质层和矿质土层中显著增加, 平均增幅分别为 1.67、2.11 倍; N 含量仅在矿质土层显著增加, 平均增幅为 4.16 倍。2 种林地化学计量变化则表现为, 随恢复年限延长, 腐殖质层 C:N 呈显著增加趋势, 到恢复 56 年时, 比半固定沙地平均增长 18.6 倍; N:P 只在灌木连续体中显著增加, C:P 未显著变化。相关分析表明, 2 种林地连续体各层间 C 含量均达到极显著正相关, 矿质土层 C 与 N、P 之间也呈极显著正相关, 腐殖质层 C:N、C:P 与矿质土层 C:P 均呈极显著正相关。综上, 榆林毛乌素沙地植被恢复过程中, 枯落物—土壤连续体 C 含量为协同增长, N、P 含量仅在矿质土层中增长明显, C:P 是连续体中相对平衡稳定的化学计量特征。

关键词: 碳氮磷含量; 生态化学计量特征; 枯落物—土壤连续体; 人工固沙林; 毛乌素沙地

中图分类号: S791.25

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0345-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.044

Stoichiometric Characteristics of the Litter-Soil Continuum in Sand Fixation Forest of the Mu Us Sandy Land

YANG Jing¹, ZHANG Yanwen¹, LI Can², TUO Weiwei¹,

WANG Yicong², DONG Wenxuan², TONG Xiaogang^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

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

Abstract: To reveal the evolution of C, N, and P contents and ecological stoichiometric ratios along the litter-soil continuum during the restoration of sand-fixing forests, artificial shrub and arbor stands with 25-56 years restoration in the Mu Us sandy land of Yulin were taken as the study object, we measured and analyzed the dynamics of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) contents, and their stoichiometric ratios along the restoration years and continuum profiles in semi-fixed sandy sites, from the litter layer to the humus layer and then to the mineral soil layer. The results showed that the C, N, and P contents and their stoichiometry in the two types of woodland at different restoration years were all in the litter layer > humus layer > mineral soil layer. However, the C content of the litter, humus and mineral soil layers increased significantly with the extension of the restoration period, with an average increase of 1.76, 35.70, and 6.45 times compared with that of the semi-fixed sandy land at 56 years; the P content increased significantly in the humus and mineral soil layers, with an average increase of 1.67 and 2.11 times, respectively; the N content increased significantly only in the mineral soil layer, with an average increase of 4.16 times. The change in stoichiometry of the two woodlands showed a significant increase in C:N in the humus layer with the increase of restoration years, with an average increase of 18.6 times compared with the semi-fixed sandy land

收稿日期: 2022-09-30

资助项目: 陕西省自然科学基金重点项目(2023-JC-ZD-10); 陕西省农业专项资金项目[NYKJ-2022-YL(XN)16]; 国家大学生创新创业训练计划项目(202210712158)

第一作者: 杨京(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事系统碳循环研究。E-mail: 1194705569@qq.com

通信作者: 佟小刚(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事人工林恢复生态效应与机制研究。E-mail: xiaogangtong@126.com

at 56 years; N : P increased significantly only in the shrub continuum; C : P did not change significantly. Correlation analysis showed that the C content of all layers in the two woodland continuums reached a highly significant positive correlation, and the C of the mineral soil layer was also highly significantly positively correlated with N and P. The C : N and C : P of the humus layer were highly significantly positively correlated with the C : P of the mineral soil layer. In conclusion, the C content of the litter-soil continuum increased synergistically during the vegetation restoration process in Yulin Mu Us sandy land, while the N and P contents increased significantly only in the mineral soil layer, and C : P was a relatively balanced and stable stoichiometric feature in the continuum.

Keywords: carbon, nitrogen and phosphorus content; stoichiometric characteristics; litter-soil continuum; artificial sand-fixing forest; Mu Us sandy land

人工林生态系统养分循环是维持脆弱生境持续恢复的重要生态过程,其中从枯落物破碎、腐解过程形成腐殖质层,再经淋溶、微生物分解转化形成土壤养分正是林地植被与土壤进行物质和能量交换的关键环节^[1]。养分在枯落物与土壤之间转化与积累的循环过程,促进着生态系统的演化与恢复^[2]。因此,探究枯落物—土壤连续体的养分循环过程对于掌握林地系统生态恢复机制具有重要的科学意义。

枯落物—土壤连续体养分循环实际是一个复杂的过程,难以清晰探究和阐述。但近年来,生态化学计量学理论提出,为研究枯落物到土壤连续体养分元素转化与交互关系提供新的视角和方法。生态化学计量学是研究生态系统能量平衡和多重化学元素相互作用的科学^[3],它主要基于有机体 C、N、P 元素的计量比关系,通过生物系统能量和多重化学元素的平衡将生物学不同层次的研究有机统一起来,受到学者认可和应用。最初的生态化学计量学研究将植被和土壤割裂,如韩文轩等^[4]和皮发剑等^[5]侧重于不同类型植物叶片化学计量特征比较,而淑敏等^[6]重点探索不同恢复年限乔木化学计量比与养分限制的内在联系。随着研究的深入,学者^[7]将植被和土壤进行更细致的划分,开始探究叶、根、枯落物和土壤等单一或两种组分的生态化学计量特征,并结合群落演替在时间维度上进行探索,研究^[8]发现,群落退化影响枯落物质量,限制土壤养分的增加^[9],尤其影响演替后期土壤的 N、P 含量^[10],最终改变土壤性质,影响养分分配和循环规律。随着学者^[11]对植被—土壤连续界面的生态化学计量特征关注日益增多,研究内容也更加多元化,一方面,重点探索植物器官、枯落物与土壤的养分循环规律;另一方面,关注林分类型、季节变化、恢复年限等对枯落物—土壤连续体各层的影响,腐殖质层对于保持人工林养分循环相对稳定具有重要作用,而不同树种的生态化学计量学特征影响养分循环,直接反映树种在生态适应策略上的差异与权衡。

研究内容由单一组分扩展到连续体上,说明仅分析生态系统某一阶段的生态化学计量特征难以充分阐释生态系统养分循环机制,而研究不同固沙林随植被恢复后枯落物—土壤连续体的生态化学计量特征变化规律,对于明确不同林分类型和恢复年限下枯落物层、腐殖质层和矿质土层的养分供应及协同变化关系具有重要作用^[12]。

毛乌素沙地是典型的荒漠治理区,已有研究^[13]表明,该地区土壤养分随植被恢复显著提升,说明植被和土壤之间或许存在着养分交换。因此,基于以上假设,以毛乌素沙地治沙区不同恢复年限灌木和乔木固沙林为对象,探究 2 种林地枯落物层、腐殖质层、矿质土层 C、N、P 含量及化学计量比随恢复年限和连续体剖面的动态变化,揭示固沙林恢复过程中枯落物—土壤连续体 C、N、P 含量和生态化学计量比的演变特征与养分关系,为深入认知荒漠化地区的地上与地下养分循环提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市红石峡试验林场(38°19'29"N, 109°43'21"E),属暖温带干旱、半干旱大陆性季风气候,年平均气温 8.5℃,无霜期为 160 天^[14],海拔 1 114 m,年平均降水量为 250~400 mm,其中,近 70%降水集中在夏季,年潜在蒸发量为 2 014 mm,平均风速达到 1.9 m/s,冬春季风蚀盛行,土壤以风沙土为主。20 世纪 50 年代以前,该地区的植被覆盖率不足 1.8%,通过长期的植被恢复,植被覆盖率提高到 80%,形成以樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv)为主要乔木树种,以花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey)和踏郎(*Hedysarum mongolicum* Turcz)为主要灌木树种的恢复生态系统。此外,研究区内还有柠条(*Caragana korshinskii* Kom)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv)、紫穗槐(*Amorpha fru-*

ticosa Linn)、沙竹 (*Psammochloa villosa* (Trin.) Bor)、猫头刺 (*Oxytropis aciphylla* Ledeb)、油蒿 (*Artemisia ordosica* Krasch)、籽蒿 (*Artemisia sieversiana* Eh rhart ex Willd)、沙竹 (*Psammochloa villosa* (Trin.) Bor)等其他植被生长。

1.2 样地选取与采样

采用时空互代法,2020 年 7 月于研究区内选取 9 个林地,分别是作为对照的半固定沙地(0 年)、恢复年限为 25,35,46,56 年的以花棒和踏郎为主的灌木人工固沙林与以樟子松为主的乔木人工固沙林。在不同恢复年限固沙林地均选择 3 个立地条件基本一致的重复样地,样地间距>50 m,并于每个样地内设置 20 m×20 m 的标准采样区。采样前在 3 个样地内对半固定沙地、灌木林和乔木林的植物类型、盖度和植株密度等植被群落特征进行调查。具体样地信

息见表 1^[15]。土壤采集按照“S”形采样法,在采样区内选取 12 个样点,在每个点上用直径为 10 cm 的土钻从枯落物钻取到 0—10 cm 的矿质土层,自下而上分离矿质土层、腐殖质层、枯落物层并装进自封袋中,每 1 份样品由 12 个采样点混合而成待测样品。同时,采用环刀法测定腐殖质层和矿质土层容重。枯落物样品在 85 ℃下烘干至恒重,机械磨碎后装袋。土壤样品风干后过 2 mm 筛,去除砾石、树根等杂质,研磨后过 0.25 mm 的筛进行指标测定。

1.3 指标测定

土样 pH 采用 pH 仪测定(土:水为 1:2.5)。枯落物层、腐殖质层和矿质土层 C 含量采用重铬酸钾氧化外加加热法测定,N 含量采用凯式定氮法^[16]测定,P 含量采用 HClO₄—H₂SO₄消煮—钼锑抗比色法^[17]测定。C、N、P 均为质量含量,C:N、N:P、C:P 均为质量比。

表 1 样地特征及土壤理化性质

样地	植被 覆盖度/%	种植密度/ (株·hm ⁻²)	枯落物生物量/ (g·m ⁻²)	土壤 pH		容重/(g·cm ⁻³)		优势种
				腐殖质层	矿质土层	腐殖质层	矿质土层	
SS	—	16	18.21±3.86g	—	8.12±0.01a	—	1.70±0.01a	籽蒿、沙竹
S ₂₅	75	870	183.63±10.85f	7.96±0.06a	8.14±0.08a	1.51±0.04a	1.58±0.11ab	踏郎、油蒿、沙竹
S ₃₅	80	930	311.95±25.28e	7.92±0.08a	8.09±0.07a	1.48±0.03ab	1.56±0.08ab	花棒、踏郎、油蒿、柠条、沙竹
S ₄₆	85	880	361.80±37.73e	7.88±0.07a	8.12±0.06a	1.46±0.06ab	1.50±0.05b	花棒、踏郎、柠条、油蒿、沙竹、猫头刺
S ₅₆	90	820	383.62±54.05e	7.85±0.06a	8.11±0.03a	1.43±0.02b	1.52±0.04b	花棒、踏郎、柠条、油蒿、沙竹、猫头刺
A ₂₅	80	1231	480.13±52.82d	7.72±0.02b	8.06±0.06a	1.45±0.04ab	1.47±0.03bc	樟子松、狗尾草、紫穗槐
A ₃₅	85	1235	771.79±31.78c	7.68±0.02b	8.04±0.02ab	1.41±0.03b	1.43±0.09bc	樟子松、狗尾草
A ₄₆	90	1280	992.85±75.25b	7.56±0.02c	7.96±0.05bc	1.33±0.02c	1.36±0.02c	樟子松、狗尾草
A ₅₆	90	1245	1 112.14±107.46a	7.48±0.07c	7.88±0.05c	1.30±0.02c	1.35±0.01c	樟子松

注:表中数据为平均值±标准差;SS 为半固定沙地;S₂₅、S₃₅、S₄₆、S₅₆ 分别为恢复年限为 25,35,46,56 年的灌木林地;A₂₅、A₃₅、A₄₆、A₅₆ 分别为恢复年限为 25,35,46,56 年的乔木林地;同列不同小写字母表示样地间差异显著($p<0.05$)。

1.4 数据分析

采用方差分析(ANOVA)和 LSD 多重比较($p<0.05$)检验不同恢复年限灌木和乔木固沙林 C、N、P 含量变化和生态化学计量特征的差异性。采用 Pearson 相关分析检验固沙林 C、N、P 含量变化和生态化学计量特征的相关性。数据均在 Excel 2016 软件进行处理后,利用 SPSS 22.0 软件分析并用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

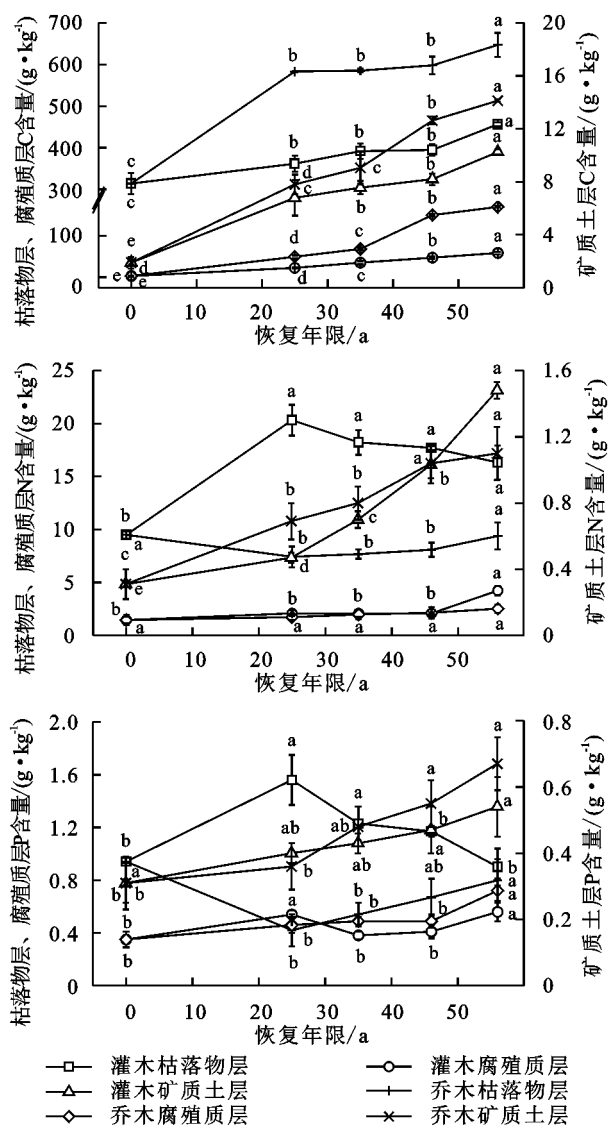
2.1 不同恢复年限枯落物—土壤连续体 C、N、P 含量

随着恢复年限的延长,除灌木枯落物层 N 和 P 含量逐渐减小,2 种林地其余各层 C、N、P 含量均呈显著增加趋势(图 1)。与对照样地(0 年)相比,恢复 56 年时,乔木枯落物层、腐殖质层和矿质土层 C 含量分别增加 2.06,53.20,7.47 倍,灌木分别仅增加 1.45,18.28,5.42 倍。从 N 含量看,灌木和乔木腐殖质层

和矿质土层 N 含量逐渐增加,在 56 年时分别为半固定的 2.88,1.72 倍和 4.77,3.55 倍,但灌木枯落物层 N 含量逐渐减小,乔木则相反。从 P 含量来看,与对照相比,恢复 56 年时乔木腐殖质层和矿质土层 P 含量分别增加 2.06,2.16 倍,对应灌木分别仅增加 1.60,1.74 倍,但灌木枯落物 P 含量逐渐降低,乔木则相反。总体可见,腐殖质层和矿质土层 C、P 含量增幅表现为乔木大于灌木。

2 种林地 C、N、P 平均含量值在连续体不同层中均表现为枯落物层>腐殖质层>矿质土层(图 2),除乔木腐殖质层 C 平均含量显著大于矿质土层($p<0.05$),其余 C、N、P 无显著性差异。枯落物层中乔木 C、灌木 N、灌木 P 平均含量最高,分别为 603.14,18.14,1.21 g/kg。矿质土层中灌木 C、乔木 N、灌木 P 平均含量最小,分别为 8.18,0.91,0.46 g/kg。连续体同一种层中,灌木枯落物和腐殖质层 C 平均含量显著小于乔木($p<0.05$),灌木枯落物层 N 和 P 平均

含量显著大于乔木($p < 0.05$),其余各层 C、N、P 平均含量在灌木和乔木中无显著性差异。

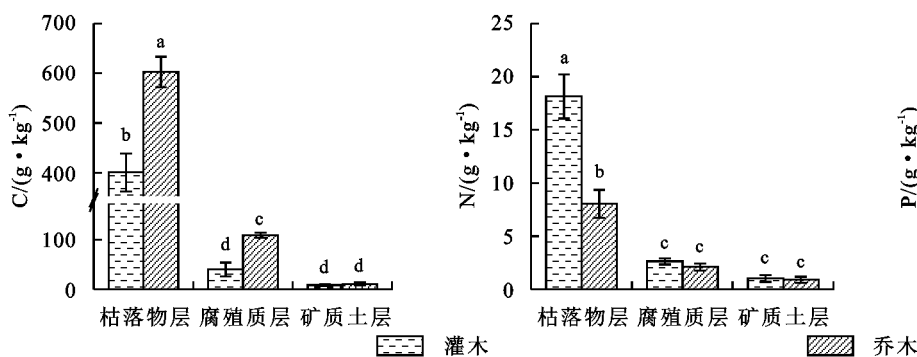


注:不同小写字母表示同一林地连续体同一层在不同恢复年限间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同恢复年限枯落物—土壤连续体的 C、N、P 含量

2.2 不同恢复年限枯落物—土壤连续体碳氮磷化学计量特征

随着恢复年限延长,除灌木矿质土层 C:N,乔木枯



注:不同小写字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 枯落物—土壤连续体 C、N、P 平均含量

Pearson 相关性分析结果表明(图 6),在 2 种林

落物层 N:P、C:P 逐渐减小,乔木腐殖质层 N:P,矿质土层 N:P、C:P 无显著变化,2 种林地其余各层 C:N、N:P、C:P 都呈现出显著增加的趋势($p < 0.05$)(图 3)。与对照(0 年)相比,恢复 56 年时,乔木枯落物层、腐殖质层和矿质土层 C:N 分别增加 2.42,30.90,2.13 倍,对应灌木分别仅增加 0.85,6.36,1.15 倍;恢复 56 年时,乔木枯落物层、腐殖质层和矿质土层 N:P 仅为对照的 1.19,0.91,1.62 倍,对应灌木则分别增加 1.79,2.03,2.70 倍;恢复 56 年乔木枯落物层、腐殖质层和矿质土层 C:P 分别增加 2.88,28.23,3.47 倍,对应灌木分别仅增加 1.51,12.94,3.10 倍。总体可见,连续体各层 C:N 和 C:P 表现为乔木大于灌木。

2 种林地的 C:N、N:P、C:P 平均值在连续体不同层中均表现为枯落物层>腐殖质层>矿质土层,且两两之间差异显著($p < 0.05$)(图 4)。枯落物层中乔木 C:N、灌木 N:P、乔木 C:P 平均值最大,分别为 77.40,15.31,1 093.40。矿质土层中灌木 C:N、乔木 N:P、灌木 C:P 平均值最小,分别为 10.12,1.83,17.88。连续体同一层中,C:N 平均值表现为乔木显著大于灌木($p < 0.05$),N:P 平均值在灌木和乔木中差异不显著,C:P 平均值表现为在矿质土层中无显著性差异,在其余各层中乔木显著大于灌木($p < 0.05$)。

2.3 枯落物—土壤连续体 C、N、P 含量及其生态化学计量变化相关性

Pearson 相关性分析结果表明(图 5),在 2 种林地的连续体不同土层中,枯落物层 C 与腐殖质层和矿质土层 C、N、P 都有显著的正相关性,腐殖质层 C、N、P 与矿质土层 C、P 均表现为显著正相关。在连续体同一层中,枯落物层 N 与 P,腐殖质层 C 与 N、N 与 P,矿质土层 C 与 N、P 均为极显著正相关($p < 0.01$)。2 种林地中连续体不同层间 C 的联系最为紧密,同一层中,C 与 N 在腐殖质层和矿质土层中均具有极显著相关性。

N:P、C:P 都有显著的正相关性,腐殖质层 C:N、C:P 与矿质土层 C:P 表现为极显著正相关,但灌木枯落物层 C:N 与其他层 C:N 为显著负相关,乔木则相反。在连续体同一层中,枯落物层 C:N 与 C:P,腐殖质层 C:N 与 C:P,矿质土层 N:P 与 C:P 均为极显著正相关($p<0.01$)。由此可知,2 种林地连续体中 C:P 与 C:N 和 N:P 都表现出极强的相关性,是较为重要的养分平衡关系化学计量比。

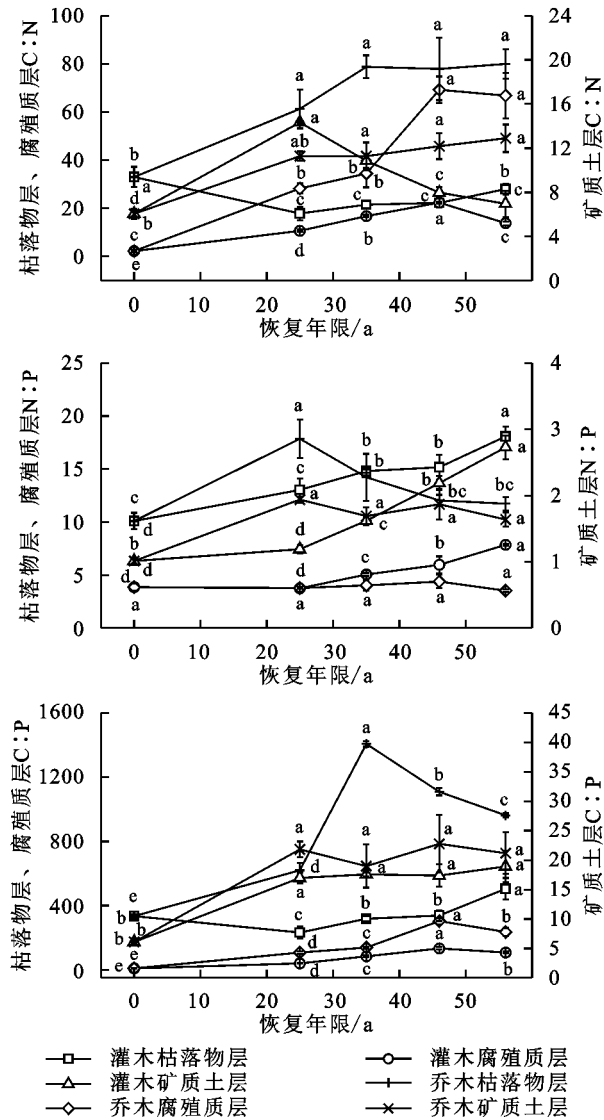


图 3 不同恢复年限枯落物—土壤连续体 C、N、P 的化学计量比

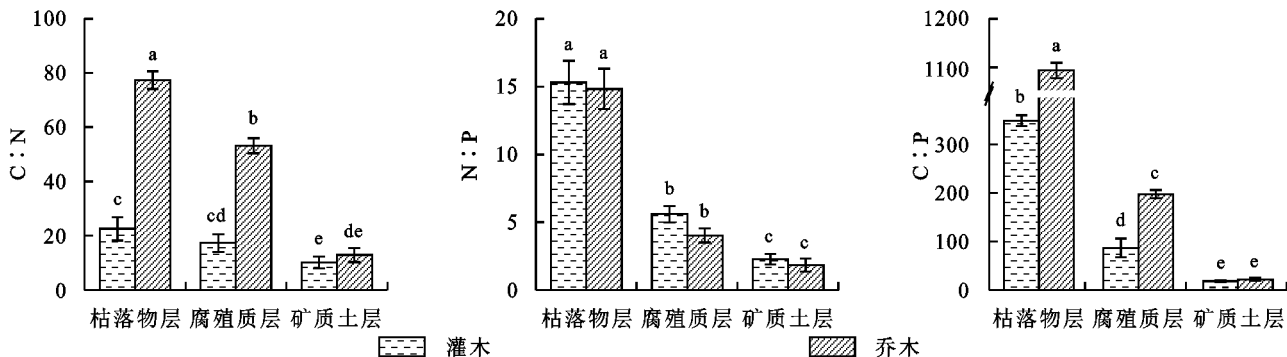


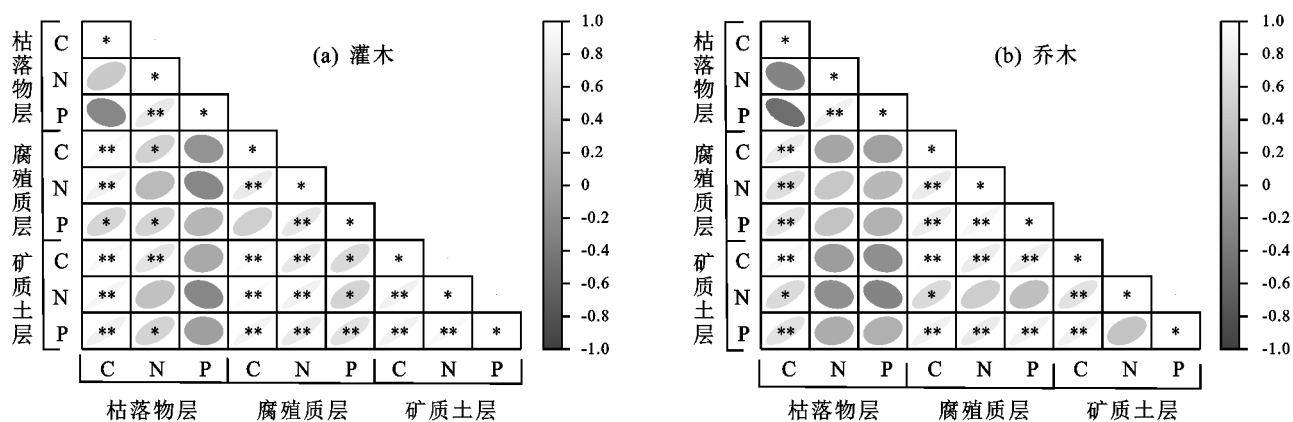
图 4 2 种林地枯落物—土壤连续体化学计量比平均值

3 讨论

3.1 固沙林枯落物—土壤连续体 C、N、P 含量演变特征

2 种林地连续体 C、N、P 含量共同表现为枯落物层 C 含量呈显著增加趋势,到腐殖质层 C、P 含量显著提升,到矿质土层 3 种养分元素均显著增加。林分类型和恢复年限是造成连续体养分含量增加的主要因素,结合 Luysaer 等^[18]对土壤养分积累与植被恢复年限相关性研究和秦娟等^[19]对林分类型与土壤养分含量的研究分析,2 个因素直接影响枯落物归还量。随着恢复年限延长,枯落物归还量逐渐增多,有效地改善土壤的水热条件和理化性质,增强土壤微生物的活性,使得枯落物能够快速分解并将养分释放到土壤中,从而增加土壤 C、N、P 含量。

本研究中,2 种林地的枯落物归还量差异明显,乔木的枯落物生物量远大于灌木,因此,恢复后期乔木各层 C、P 含量接近或大于灌木。结合不同恢复年限,2 种林地 C、N、P 平均含量,灌木枯落物层 C、N、P 平均含量比鲁志云等^[20]所测哀牢山常绿阔叶林枯落物 C 含量(497.98 g/kg)低,N、P 含量(14.74,0.81 g/kg)高,可能是由于气候差异、植被类型和恢复时间不同导致的。相较于灌木,乔木枯落物 C 平均含量更高,但 N、P 平均含量减少,证明不同植被间具有养分差异性^[21]。连续体各层 N 含量表现为灌木大于乔木,且灌木在 25~56 年有逐渐减少的趋势,是由于灌木枯落物本身 N 含量高,养分归还后使得连续体土壤部分的 N 含量相应提高,但灌木易出现林分衰退,造成恢复后期植被的养分吸收量下降,导致枯落物层 N 含量逐年减少。灌木和乔木腐殖质层因枯落物输入出现养分增加,但二者含量无显著差异,表明 2 种林地腐殖质层涵养养分能力基本相同。2 种林地矿质土层 N、P 平均含量与全国水平(1.06, 0.65 g/kg)相近^[22],但灌木 C 低于乔木,证明灌木林土壤固碳能力比乔木弱。



注: * 表示 $p < 0.05$ 极显著水平; ** 表示 $p < 0.01$ 显著水平。下同。

图 5 枯落物—土壤连续体 C、N、P 含量相关性分析

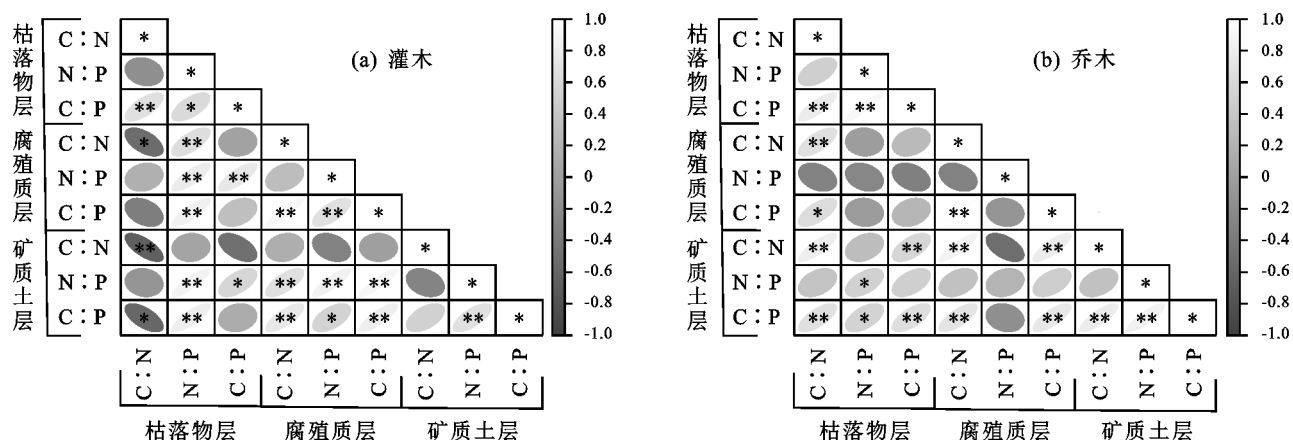


图 6 枯落物—土壤连续体生态化学计量比相关性分析

3.2 固沙林枯落物—土壤连续体 C、N、P 生态化学计量比演变特征

植被恢复过程中枯落物分解速率会影响连续体养分循环快慢,可以从化学计量比角度进行探究。枯落物层化学计量比影响生态系统的养分质量和回报率^[23-24],腐殖质层化学计量比能直观地反映养分供应情况,矿质土层化学计量比可反映土壤肥力^[25]。众多研究^[26]发现,当枯落物 N 含量升高或 C:N 值降低加快枯落物分解速率,加速养分循环。枯落物 C:N>25 时,对微生物造成 N 限制,影响枯落物的分解,而当 C:N<40 时,枯落物出现矿化分解并释放净 N。本研究中,25~56 年乔木枯落物层 C:N 为 61.31~79.97,高于全国平均水平(44.8),并且随着恢复年限延长呈现出显著增加的趋势($p < 0.05$),表明以樟子松为主的乔木枯落物分解速率慢, N 元素成为限制乔木枯落物分解的主要因素。灌木枯落物层 C:N 随恢复年限延长由 17.79 增长到 27.94,始终维持在一个相对平稳的水平,灌木枯落物分解不会受到 N 限制。

枯落物分解的养分归还土壤后,即影响植被的生长。有研究^[27]发现,土壤 C:N 和 C:P 可以作为评价

土壤氮、磷有效性的重要指标,用来判断植被生长主要受何种元素限制。土壤 C:N 和 C:P 越低,说明其有效 N 和 P 含量越高。本研究中,25~56 年灌木连续体矿质土层 C:N 随着恢复年限延长而减小,平均值为 10.1,低于全国平均水平(12.3),说明灌木矿质土层 N 的有效性随植被恢复而增加,灌木的生长不易受到 N 限制。乔木矿质土层 C:N 随恢复年限延长而增加,平均值为 12.9,说明矿质土层 N 释放缓慢,乔木可能受 N 限制。灌木和乔木矿质土层 C:P 都不随恢复年限发生太大变化,均低于全国平均水平(61),说明 P 有效性没有增加,植被生长可能受 P 限制。土壤 N:P 是养分限制类型的预测指标,2 种林地 N:P 都低于全国平均水平(5.2),灌木矿质土层 N:P 随着恢复年限延长而增加,说明灌木更有可能受到 P 限制。乔木矿质土层 N:P 基本不随时间变化,说明乔木有可能同时受到 N 和 P 限制。

3.3 固沙林恢复过程枯落物—土壤连续体养分互作关系

本研究中,2 种林地枯落物层 C 含量与腐殖质层和矿质土层的 C、N、P 含量均有显著正相关关系,说明与 N、P 相比,C 含量在连续体各层中养分循环过程中发挥

更为重要的作用,有利于土壤有机质的积累,同时说明枯落物对于腐殖质层和矿质土层养分库影响较大。腐殖质层和矿质土层之间,以及矿质土层内 C、N、P 也彼此正相关,证明 C、N、P 养分之间具有一定的耦合关系^[28],其相互作用影响连续体养分平衡。

灌木枯落物层 C : N 与腐殖质层和矿质土层 C : N 均呈负相关关系,与王维奇等^[29]相关性研究结果不一致,原因可能是林分类型、水分光热条件、群落组成、生长发育期等直接或间接影响植被的养分元素含量^[30]。2 种林地连续体不同层中 C : P 与 C : N 或 N : P 均呈显著的正相关关系,说明 C : P 可能对于固沙林连续体养分元素平衡起到关键作用。同时,灌木连续体各层 N : P,乔木连续体各层 C : N 之间呈显著正相关关系,说明枯落物—土壤连续体作为地上到地下养分循环的载体,深刻影响土壤养分供应和植被生长。此外,人工恢复的林地上无法进行自然更新,要及时更新凋萎的树木,并且在今后的研究中,应当在更大尺度上探究其相关性^[31]。

4 结论

(1)榆林毛乌素沙区 2 种林地 C、N、P 含量及其化学计量比均以枯落物层最大,矿质土层最小,说明固沙林连续体各层次养分需求与平衡关系显著不同。随着恢复年限延长,2 种林地枯落物—土壤连续体中,枯落物层仅 C 含量呈显著增加趋势,到腐殖质层 C、P 亦能显著提升,到矿质土层 3 种养分元素均显著累积增加,说明连续体养分向土壤转化明显。连续体各层次养分元素含量的不平衡增加,使得 C : N 在 2 种林地连续体腐殖质层显著增加,N : P 在灌木连续体各层均显著增加,C : P 在 2 种林地则表现出相对的内稳性,变化不明显。

(2)2 种林地连续体各层 C 都极显著正相关($p < 0.01$),且矿质土层 C 与 N、P 之间也呈极显著正相关,说明 C 在连续体养分循环过程中发挥主要作用,各层 C 含量出现协同增长现象,证明土壤 C、N、P 养分之间具有密切的耦合关系。

(3)2 种林地连续体各层 C : P 与其余化学计量比相关性最强,说明在植被恢复过程中,C : P 可能对于固沙林连续体养分元素平衡关系起着重要的调控作用。

参考文献:

[1] 郑俊强,韩士杰.氮在凋落物—土壤界面连续体转移研究进展[J].北京林业大学学报,2016,38(4):116-122.
[2] 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.
[3] Liu R S, Wang D M. C : N : P stoichiometric characteristics and seasonal dynamics of leaf-root-litter-soil in plantations on the loess plateau [J]. Ecological Indicators, 2021, 127: e107772.
[4] 韩文轩,吴漪,汤璐璐,等.北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J].北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(5): 855-860.
[5] 皮发剑,袁丛军,喻理飞,等.黔中天然次生林主要优势树种叶片生态化学计量特征[J].生态环境学报, 2016, 25(5): 801-807.
[6] 淑敏,姜涛,王东丽,等.科尔沁沙地不同林龄樟子松人工林土壤生态化学计量特征[J].干旱区研究, 2018, 35(4): 789-795.
[7] Yuan Z Y, Chen H Y H, Reich P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus [J]. Nature Communications, 2011, 2(1): 1-6.
[8] 姜沛沛,曹扬,陈云明,等.不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征[J].生态学报, 2016, 36(19): 6188-6197.
[9] 阎恩荣,王希华,周武.天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N : P 化学计量特征[J].植物生态学报, 2008, 32(1): 13-22.
[10] 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.
[11] 刘娜,喻理飞,赵庆,等.喀斯特高原石漠化区次生林叶片—枯落物—土壤连续体碳氮磷生态化学计量特征[J].应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 681-688.
[12] Dong Z W, Li C J, Li S Y, et al. Stoichiometric features of C, N, and P in soil and litter of *Tamarix cones* and their relationship with environmental factors in the Taklimakan Desert, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 20(2): 690-704.
[13] 蒋小董,郑嗣蕊,杨咪咪,等.毛乌素沙地固沙林发育过程中土壤有机碳库稳定性特征[J].应用生态学报, 2019, 30(8): 2567-2574.
[14] Cheng S L, Ouyang H, Niu H S, et al. Spatial and temporal dynamics of soil organic carbon in reserved desertification area—a case study in yulin city, Shaanxi Province, China [J]. Chinese Geographical Science, 2004, 14: 245-250.
[15] Zhang D X, Chen X Y, Fu G J, et al. Dissimilar evolution of soil dissolved organic matter chemical properties during revegetation with arbor and shrub in desertified

- land of the Mu Us Desert[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: e152904.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 45-52.
- [17] Zhang Y L, Chen L J, Chen Z H, et al. Soil nutrient contents and enzymatic characteristics as affected by 7-year no tillage under maize cropping in a meadow brown soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 10(2): 150-157.
- [18] Luysaert S, Schulze E D, Börner A, et al. Old growth forests as global carbon sinks [J]. *Nature*, 2008, 455 (7210): 213-215.
- [19] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 598-604.
- [20] 鲁志云, 宋亮, 王训, 等. 哀牢山森林凋落物与腐殖质及土壤的生态化学计量特征[J]. *山地学报*, 2017, 35(3): 274-282.
- [21] Kang H Z, Xin Z J, Berg B, et al. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants[J]. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(8): e811.
- [22] 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, 22(3): 327-346.
- [23] Xiao C W, Guenet B, Zhou Y, et al. Priming of soil organic matter decomposition scales linearly with microbial biomass response to litter input in steppe vegetation[J]. *Oikos*, 2015, 124(5): 649-657.
- [24] Zhang X M, Wang Y D, Zhao Y, et al. Litter decomposition and nutrient dynamics of three woody halophytes in the Taklimakan desert highway shelterbelt [J]. *Arid Land Research and Management*, 2017, 31(3): 335-351.
- [25] Bai X J, Wang B R, An S S, et al. Response of forest species to C : N : P in the plant-litter-soil system and stoichiometric homeostasis of plant tissues during afforestation on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2019, 183: e104186.
- [26] 许宇星, 王志超, 张丽丽, 等. 不同种植年限尾巨桉人工林叶片—凋落物—土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(6): 168-174.
- [27] 何斌, 李青, 冯图, 等. 黔西北不同林龄马尾松人工林针叶—凋落物—土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(11): 2149-2157.
- [28] Wang Y F, Duan W B, Qu M X, et al. Differences of carbon and nitrogen stoichiometry between different habitats in two natural Korean pine forests in Northeast China's mountainous areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(5): 1324-1335.
- [29] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. *环境科学*, 2012, 31(10): 2411-2416.
- [30] 张萍, 章广琦, 赵一婷, 等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5087-5098.
- [31] 王亚娟, 陈云明, 孙亚荣, 等. 黄土丘陵区油松人工林植物器官—凋落物—土壤化学计量特征的季节变化[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 350-356.