

陕西省子洲县 5 种人工林类型不同土层 土壤养分及化学计量学特征

曹东平¹, 高艳波¹, 陈富彩¹, 封凯¹, 雷延瑾², 彭少兵², 徐伟洲³, 陈书军²

(1. 榆林市林业工作站, 陕西 榆林 719000; 2. 西北农林科技大学
林学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 榆林学院 现代农学院, 陕西 榆林 719000)

摘要: [目的] 探究陕西省子洲县不同类型人工林土壤养分及化学计量特征, 为该区生态治理修复提供科学依据。[方法] 以子洲县 5 种典型人工林(油松纯林、侧柏纯林、刺槐纯林、山杏侧柏混交林和刺槐山杏混交林)为研究对象, 以自然草地作为对照, 研究不同林分类型 0—100 cm 土层不同深度土壤的有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量及生态化学计量特征。[结果] 5 种人工林土壤 C、N、P 含量的变化范围分别为 4.56~3.31 g/kg, 0.29~0.23 g/kg, 0.58~0.55 g/kg。在 0—100 cm 土层中 C、N、P 含量均表现为山杏侧柏混交林最高, 且与其余林分类型呈现显著差异。土壤 C、N 含量呈现出随着土层深度的增加而降低的趋势。混交林各土层 TN 含量大于纯林; 除 60—80 cm 和 80—100 cm 土层外, 其余土层 SOC 和 TP 含量均表现为山杏侧柏混交林最高。5 种人工林土壤 C:P, C:N, N:P 变化范围分别为 7.75~5.69, 16.30~14.14, 0.50~0.40。各土层 C:P 均表现为侧柏纯林最低; 而 N:P 则表现为: 混交林>纯林。不同林分类型中土壤 TN 和 SOC 均与 N:P 呈显著正相关, 而在不同土层深度下 TN 和 SOC 则与 C:P 和 N:P 呈显著正相关。[结论] 土壤养分和土壤化学计量特征在不同人工林类型间呈现显著差异, 整体来看山杏侧柏混交林土壤养分和土壤化学计量高于其余林分类型, 因此营造混交林能够提高林分生产力和稳定性。

关键词: 人工林类型; 土壤养分; 土壤化学计量比; 黄土丘陵沟壑

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0072-09

中图分类号: S718.5, S714

文献参数: 曹东平, 高艳波, 陈富彩, 等. 陕西省子洲县 5 种人工林类型不同土层土壤养分及化学计量学特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 72-80. Cao Dongping, Gao Yanbo, Chen Fucui, et al. Soil nutrients and stoichiometric characteristics in different soil layers of five artificial forest types in Zizhou County, Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 72-80. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.019; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.019.

Soil nutrients and stoichiometric characteristics in different soil layers of five artificial forest types in Zizhou County, Shaanxi Province

Cao Dongping¹, Gao Yanbo¹, Chen Fucui¹, Feng Kai¹,
Lei Yanjin², Peng Shaobing², Xu Weizhou³, Chen Shujun²

(1. Yulin Forestry Workstation, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Advanced Agricultural Sciences, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: [Objective] The soil nutrients and stoichiometric characteristics of different artificial forest types in Zizhou County, Shaanxi Province were analyzed, in order to provide a scientific basis for ecological management and restoration in the region. [Methods] Five representative artificial forest types in Zizhou County (*Pinus tabulaeformis* pure forest, *Platycladus orientalis* pure forest, *Robinia pseudoacacia* pure forest, *Prunus armeniaca* × *P. orientalis* mixed forest, and *R. pseudoacacia* × *P. armeniaca* mixed forest) were selected as the study objects, with natural grassland as the control. The contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) as well as their ecological stoichiometric characteristics of different soil layers

收稿日期: 2025-03-30

修回日期: 2025-06-16

采用日期: 2025-06-17

资助项目: 陕西省榆林市发展和改革委员会项目“陕北地区退化生态系统治理与修复植物配置模式研究服务项目”(2023-YLSFGW-60); 陕西省榆林市科学技术局 2024 年市级科技计划项目(2024-CXY-188)

第一作者: 曹东平(1971—), 男(汉族), 陕西省绥德县人, 高级工程师, 主要从事林草资源保护、毛乌素沙地和黄土丘陵沟壑区植被恢复、沿黄高质量发展和林业技术推广等工作。Email: 603293019@qq.com。

(0—100 cm) under different forest stand types were investigated. [Results] The ranges of soil C, N, and P contents under five artificial forest types were 4.56—3.31 g/kg, 0.29—0.23 g/kg, and 0.58—0.55 g/kg, respectively. Within the 0—100 cm soil profile, the *P. armeniaca*×*P. orientalis* mixed forest showed the highest C, N, and P contents, with significant differences compared to other forest stand types. Both soil C and N contents exhibited decreasing trends with increasing soil depth. The TN content in mixed forests was higher than that in the pure forests of all soil layers. The SOC and TP contents in all soil layers except the 60—80 cm and 80—100 cm layers were highest in the *P. armeniaca*×*P. orientalis* mixed forest. The variation ranges of C:P, C:N, and N:P in soil of the five artificial forest types were 7.75—5.69, 16.30—14.14, and 0.50—0.40, respectively. For all soil layers, C:P ratios were the lowest in the pure forest of *P. orientalis*, while N:P ratios were higher in mixed forests than in pure forests. TN and SOC were significantly positively correlated with N:P in different forest stand types, and they were significantly positively correlated with both C:P and N:P at different soil depths. [Conclusion] Soil nutrients and stoichiometric characteristics differ significantly of different artificial forest types. Overall, the *P. armeniaca*×*P. orientalis* mixed forest demonstrates superior soil nutrient level and stoichiometric characteristics compared to other forest stand types. These findings indicate that mixed forests can enhance forest stand productivity and stability.

Keywords: artificial forest types; soil nutrients; soil stoichiometric ratios; loess hilly-gully region

土壤作为维持陆地生命活动的基础介质,不仅是生物圈能量流动与物质循环的核心载体^[1],还是森林生态系统重要组成部分,对植物生长、凋落物分解、养分循环、微生物活动等生态过程具有重要的作用。生态化学计量学是研究生态系统中能量平衡、土壤养分、物质循环等内容的科学^[2],主要研究各项生态过程中碳(C)、氮(N)、磷(P)元素间的计量关系。C, N, P元素不仅是土壤的主要组成元素,同时也是生态系统中养分循环的核心,是评价土壤质量和植被生长状况的重要指标^[3-4]。其中,土壤有机碳(SOC)是评价土壤肥力状况的重要指标,对于提高土壤养分积累、促进植物生长、调控土壤水分状况等方面具有重要作用^[5];土壤N和P参与植物多项生态过程^[6],是植物生长、物质循环和能量转换的重要元素,并且影响着森林生态系统碳汇作用的发挥^[7]。因此,研究土壤C, N, P化学计量特征对解析森林生态系统结构与功能、调控养分平衡机制以及优化林分生产力具有重要的理论和实践意义。

土壤C, N, P养分含量和化学计量特征受到多种因素的影响,不同林分类型土壤养分含量和化学计量比不同^[8]。林分类型、林龄、凋落物种类、微生物活性、土壤结构等因素都会造成土壤化学计量比的差异^[9]。有研究表明,凋落物的种类会对土壤C, N, P化学计量比产生影响^[10]。由于凋落物种类不同,其组成成分和有机质含量存在差异,使其在土壤中的分解速率不同,导致不同林分类型土壤养分的输入和释放存在差异,这种差异又间接影响了植被的生长状况^[11]。此外,土层深度也是调控土壤养分含量

和土壤化学计量比的关键因素,随着土层深度的增加,土壤微生物活性和根系活动变化,使不同林分土壤养分和化学计量在土壤剖面呈现垂直分布的规律。张亚冰等^[12]对月亮山不同森林类型土壤化学计量的研究表明,不同林分类型和不同土层深度下土壤养分含量和化学计量比存在显著差异。现有关于土壤化学计量学的研究多集中于草地、纯林、农田^[10-12],但对黄土丘陵沟壑区典型人工林树种相互作用对土壤养分和化学计量学的影响机制仍缺乏相关研究。

陕西省子洲县位于黄土丘陵沟壑区,地形破碎,沟壑纵横,地貌复杂多样。近年来,该区气候变化和人类活动的增加加剧了区域内的生态环境问题,尤其是水土流失,已成为该地最为突出的生态问题之一。为应对这一问题子洲县开展了退耕还林、封山育林、植树造林等措施,这些措施在控制水土流失,改善土壤质量和提高植被覆盖率方面取得了一定成效。然而,由于黄土丘陵沟壑区的土壤水分条件有限,加之不同植被类型对土壤和气候适应性差异显著,该地区不同类型林分下土壤养分和土壤化学计量特征尚需进一步研究。因此,本研究以子洲县5种典型人工林为研究对象,通过测定各人工林类型不同土层深度下(0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm和80—100 cm)土壤C, N, P含量,阐明不同人工林类型影响下土壤C, N, P含量的差异性和相关性,旨在揭示土壤养分和化学计量特征在不同林分 and 不同土层深度下的变化规律,为该区域生态系统的治理修复及保护提供科学依据。

1 材料与方

1.1 研究区概况

本研究以位于黄土丘陵沟壑区的榆林市子洲县为研究对象,该区域位于榆林市南部的大理河中游地区(37°17'—37°50'N,109°29'—110°07'E),面积为2 024 km²。子洲县属于温带大陆季风性气候,年平均气温8~10℃,年平均降水量400~500 mm,降水主要集中在夏季(6—8月)。海拔高度在868~1 408 m,土壤类型以黄绵土为主,土层深厚,但有机质含量低,易受侵蚀;局部地区分布有肥力较好的黑垆土、适合果树的褐土以及北部靠近毛乌素沙地的风沙土。

子洲县位于暖温带落叶阔叶林带向草原带的过渡地带,植被类型以草本植物为主,也有部分木

本植物和少量半灌丛,目前主要植物有油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。

1.2 样地调查及布设

2024年6—8月,以子洲县现有典型人工林为对象,通过实地踏查,选择的人工林类型包括:油松纯林(YS)、侧柏纯林(CB)、刺槐纯林(CH)、山杏-侧柏混交林(SXCB)和刺槐-山杏混交林(CHSX),选取仅覆盖草本植物和灌木的自然坡地作为对照。在林龄约20 a的代表性人工林和仅覆盖草本植物和灌木的自然坡地进行样地布设,每种人工林类型和对照均设置3个面积约500 m²的样地作为重复,样地内设置一个20 m×20 m的样方,共计布设18个样方。样地具体信息详见表1。

表 1 试验样地基本信息

Table 1 Basic information of sample sites

样地	海拔高度/m	坡度/(°)	东经	北纬	主要植物
油松纯林(YS)	1 130	23	109°76'	37°53'	油松、河朔堯花(<i>Wikstroemia chamaedaphne</i>)、铁马鞭(<i>Lespedeza pilosa</i>)
侧柏纯林(CB)	1 058	18	110°02'	37°63'	侧柏、沙棘、茵陈蒿(<i>Artemisia capillaris</i>)
刺槐纯林(CH)	1 084	26	110°03'	37°58'	刺槐、叉子圆柏(<i>Juniperus sabina</i>)、野艾蒿(<i>Artemisia lavandulifolia</i>)
山杏侧柏混交林(SXCB)	1 009	19	110°03'	37°60'	侧柏、山杏(<i>Prunus sibirica</i>)、河朔堯花(<i>Wikstroemia chamaedaphne</i>)、黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)
刺槐山杏混交林(CHSX)	1 049	25	110°02'	37°59'	刺槐、山杏(<i>Prunus sibirica</i>)、紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)、狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>)
对照(CK)	1 043	22	110°04'	37°65'	毛蓬蒿(<i>Artemisia vestita</i>)、铁马鞭(<i>Lespedeza pilosa</i>)、地梢瓜(<i>Cynanchum thesioides</i>)

1.3 样品采集与指标测定

于2024年8月,在样方内的对角线上选3个点作为3个重复。除去表面枯落物后于各采样点用土钻采集0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm共5个不同深度的土壤,获取土样270份,去除杂质及大颗粒,装入密封袋中带回实验室。将样品放在阴凉干燥通无特殊气体和尘土污染的室内,经过自然风干后拣出枯枝落叶和植物根杂质,经研磨过筛用于测定土壤养分。

所测定的土壤指标包括:土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[13];全氮(TN)含量采用凯氏测氮法测定^[14];全磷(TP)含量采用碱熔-钼锑抗比色法测定^[15]。

1.4 数据处理

在SPSS 26.0软件中利用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同人工林类型对土壤理化性质和土壤化学计量比的影响;用最小显著法(LSD)分析土壤C, N, P含量和化学计量在不同人工林类型

间差异的显著性;运用Pearson相关分析对土壤性质和化学计量比之间进行相关性分析,采用GrapPad Prism10软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型人工林地土壤C, N, P含量的垂直分布特征

如图1所示,不同林分类型的土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量呈现显著的垂直分布特征。各林分类型土壤TN含量均随土层深度增加而递减,且在不同林分类型间存在显著差异。在0—20 cm表土层,山杏侧柏混交林和刺槐纯林表现出更强的固氮能力,土壤TN含量较对照样地升高40.62%和45.59% ($p < 0.05$)。在20—40 cm土层各样地之间差异不显著,但在40—60 cm, 60—80 cm和80—100 cm土层深度下山杏侧柏混交林的TN含量显著高于其余林分,相较于对照样地分别高出1.24, 1.17和1.10倍。土壤SOC含量同样也是随土层深

度的增加而降低,并且在 0—40 cm 表层土和 80—100 cm 深层土中的含量差异达到显著水平($p < 0.05$)。0—60 cm 深度的土层中,山杏侧柏混交林 SOC 高于其余林分。在 0—20 cm 土层中,山杏侧柏混交林 SOC 含量达到 8.10 g/kg,较对照样地高出 39.66%,在 20—40 cm 土层中其含量为 5.14 g/kg,显著高于其余林分类型 ($p < 0.05$),同时较对照样地高出 34.91%,而在 40—60 cm 深度时各林分 SOC 差异不再显著。不同人工林的土壤 TP 含量变化趋势则没有呈现出随深度增加而降低的情况。在 0—60 cm 深度中山杏侧柏混交林的土壤 TP 含量较其余林分高,分别为 0.60, 0.59 和 0.58 g/kg,且存在显著差异 ($p < 0.05$),显著高出对照样地 11.11%, 11.32% 和 9.43%。在不同人工林类型 0—100 cm 土层中, C, N, P 含量的变化范围分别为 4.56~3.31 g/kg, 0.29~0.23 g/kg, 0.58~0.55 g/kg。山杏侧柏混交林的 SOC, TN, TP 含量显著高于其余林分,这说明营造混交林能够在一定程度上增加土壤养分的积累。与对照样地相比,侧柏纯林的 SOC, TN 含量和刺槐山杏混交林中的 SOC 含量显著较低,而不同人工林类型中土壤 TP 的含量都显著高于对照样地。

由图 2 可知,土壤 C, N, P 化学计量比在各林分类型之间存在显著差异。在 0—20 cm 和 20—40 cm 的表层土中,山杏侧柏混交林的 C:P 显著高于其他林分,分别达到了 13.43 和 8.75,较对照样地升高了 23.91% 和 21.55%。各人工林类型间的 C:N 在 0—20 cm 和 20—40 cm 表层土差异不显著。对照样地的 C:N 在 0—20 cm, 40—60 cm 和 80—100 cm 土层高于其余林分类型,且在 40—60 cm 和 80—100 cm 深度下与各林分存在显著差异 ($p < 0.05$)。随着土层深度的增加,土壤中的氧气和微生物活动减少,分解速率降低,由于对照样地凋落物木质素含量较低,深层有机质分解较慢,C:N 保留较高,而不同林分通过植物根系的活动促进了有机物的分解并运输更多的氮到深层,从而降低了 C:N。山杏侧柏混交林的 N:P 在 40—100 cm 的深层土中高于其余林分类型,并且在 60—100 cm 深度与各林分之间呈现显著差异 ($p < 0.05$),在不同深度下较对照样地分别高出 13.01%, 7.51% 和 1.49%。而在 0—40 cm 的表层土中刺槐纯林的 N:P 较高,分别达到 0.82 和 0.49,相较于对照样地高出 1.34 和 1.07 倍。在 0—20 cm 土层中不同人工林类型间的 N:P 呈现显著差异性。不同林分类型在 0—100 cm 土层深度下, C:P, C:N 和 N:P 的变化范围分别为 7.75~5.69, 16.30~14.14 和 0.50~0.40,各

林分类型间的土壤化学计量也存在显著差异 ($p < 0.05$)。与对照样地相比,山杏侧柏混交林的 C:P 显著较高,高出 1.05 倍,而侧柏纯林则显著较低;对照样地中的 C:N 要显著高于其他林分;山杏侧柏混交林中的 N:P 显著较高,相较于对照样地高出 1.11 倍,混交林中的凋落物促进了氮的矿化,而磷的释放受到了限制,同时混交林中的微生物多样性丰富,能够有效分解含氮化合物,而磷被固定在土壤有机质中,减少其有效性。

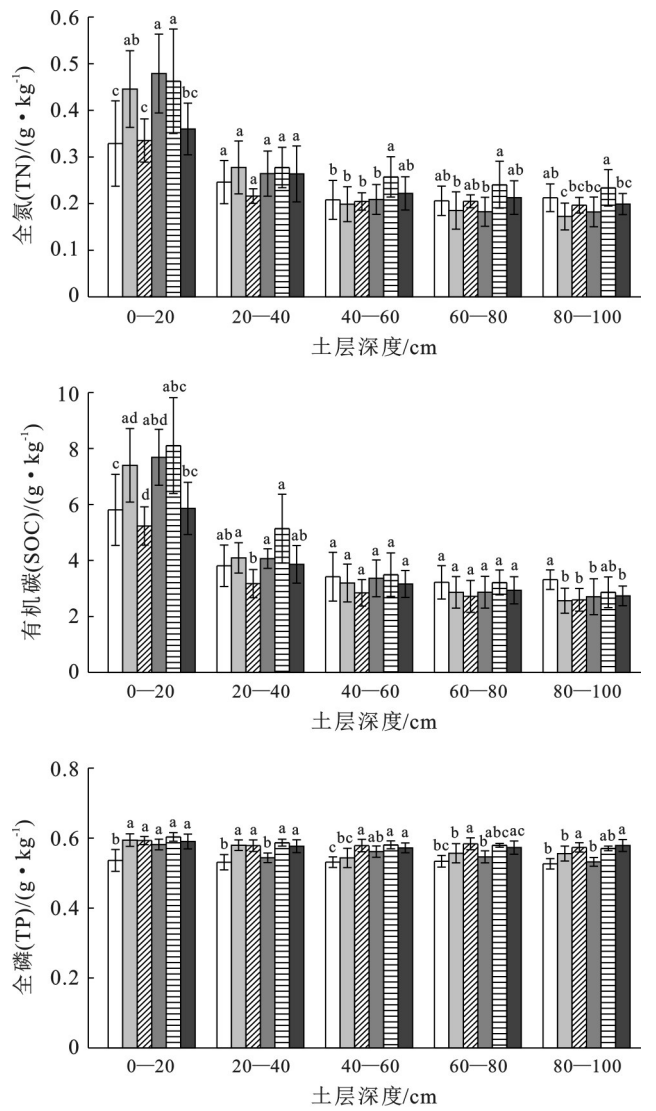


图 1 不同林分类型土壤 C, N, P 含量垂直分布特征
 Fig.1 Vertical distribution characteristics of soil C, N, and P contents under different forest stand types
 注:①CK 代表对照; YS 代表油松纯林; CB 代表侧柏纯林; CH 代表刺槐纯林; SXCB 代表山杏侧柏混交林; CHSX 代表刺槐山杏混交林。②不同小写字母表示不同样地间的差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同林分类型土壤 C, N, P 含量垂直分布特征
 Fig.1 Vertical distribution characteristics of soil C, N, and P contents under different forest stand types

2.2 土壤性质与土壤化学计量特征间的相关关系
 由表 2 可知,土壤全氮 (TN) 和土壤有机碳

(SOC)在不同人工林类型中均与N:P呈显著正相关($p<0.05$);同时,SOC与C:P之间的正相关性在所有林分类型中同样显著($p<0.05$);此外,除山杏侧柏混交林外的样地中,土壤全磷(TP)与C:N均呈现负相关关系,且在油松纯林、侧柏纯林和刺槐山杏混交林中达到显著性水平($p<0.05$)。

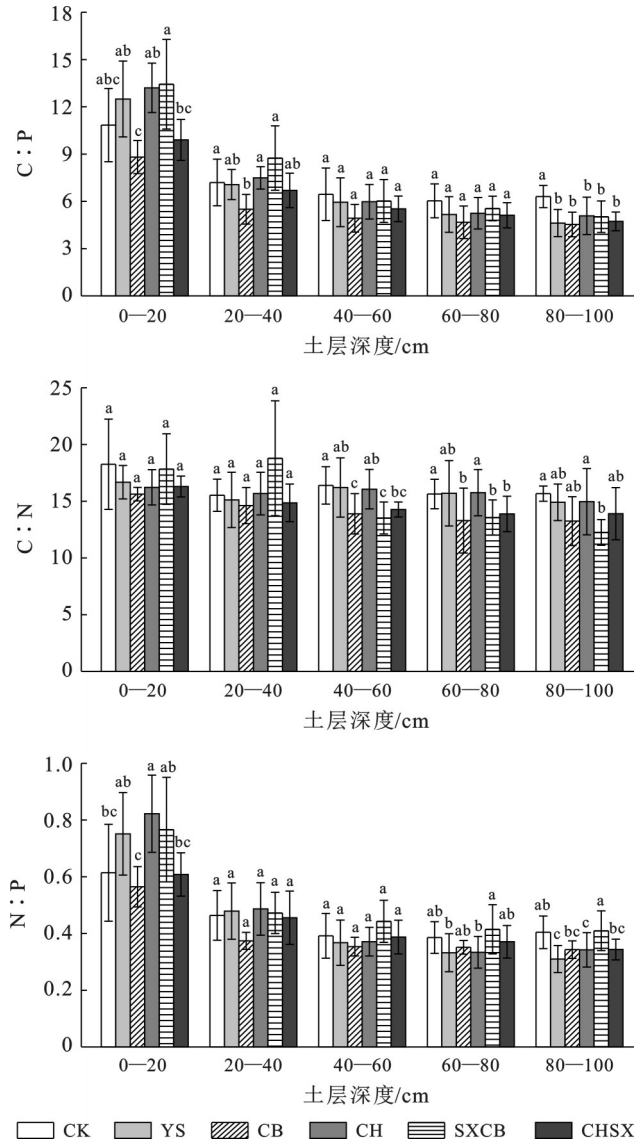


图2 不同林分类型土壤C, N, P化学计量比垂直分布特征

Fig.2 Vertical distribution characteristics of soil C, N, P stoichiometric ratios under different forest stand types

由表3可以看出,在0—100 cm土层范围内,TN与C:P和N:P均呈显著正相关,而与C:N的相关性在表层(0—20 cm)和深层(60—80 cm及80—100 cm)土壤中显著负相关;SOC与C:P, N:P在所有深度下均显著正相关,但C:N与SOC的显著正相关仅出现在20 cm以下土层;而TP在40 cm以下的深层土壤中与C:P, C:N呈显著负相关。

表2 不同林分类型土壤性质与C, N, P化学计量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between soil properties and C, N, P stoichiometry under different forest stand types

林分类型	指标	TN	SOC	TP	C:P	C:N	N:P
CK	TN	1					
	SOC	0.94**	1				
	TP	-0.12	-0.14	1			
	C:P	0.91**	0.97**	-0.38	1		
	C:N	-0.58	-0.27	-0.00	-0.24	1	
	N:P	0.98**	0.93**	-0.34	0.95**	-0.54	1
YS	TN	1					
	SOC	0.84**	1				
	TP	-0.11	-0.55	1			
	C:P	0.76*	0.99**	-0.68*	1		
	C:N	-0.40	0.15	-0.73*	0.27	1	
	N:P	0.98**	0.91**	-0.29	0.86**	-0.26	1
CB	TN	1					
	SOC	0.55	1				
	TP	0.31	-0.49	1			
	C:P	0.45	0.99**	-0.60	1		
	C:N	0.12	0.89**	-0.73*	0.93**	1	
	N:P	0.93**	0.77*	-0.06	0.71*	0.41	1
CH	TN	1					
	SOC	0.77*	1				
	TP	0.85**	0.73*	1			
	C:P	0.70*	0.99**	0.65	1		
	C:N	-0.42	0.21	-0.38	0.31	1	
	N:P	0.10*	0.77*	0.83**	0.70*	-0.41	1
SXCB	TN	1					
	SOC	0.73*	1				
	TP	0.48	0.48	1			
	C:P	0.72*	0.10**	0.42	1		
	C:N	-0.35	0.37	0.03	0.38	1	
	N:P	0.10*	0.72*	0.43	0.72*	-0.36	1
CHSX	TN	1					
	SOC	0.96**	1				
	TP	0.65	0.50	1			
	C:P	0.90**	0.98**	0.31	1		
	C:N	-0.63	-0.39	-0.68*	-0.25	1	
	N:P	0.99**	0.97**	0.53	0.94**	-0.57	1

注:*,**分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平显著相关。下同。

3 讨论

3.1 不同人工林类型土壤C, N, P含量特征

不同的林分类型会影响到土壤养分含量和利用效率,植被多样性的增加能够调控其生产力,从而提高土壤中养分的含量^[16]。在不同的林分类型下本研

究结果表明山杏侧柏混交林中的土壤C, N, P含量显著高于其余样地,这说明混交林能够促进土壤C, N, P含量的积累,这与白昱欣等^[17]研究树种混交林相比于纯林能够增加土壤中养分含量积累的结果一致。树种多样性的增加能够显著提高植被的生产力,并且增加土壤中有有机碳的含量。土壤全氮(TN)和全磷(TP)作为林木生长的必要元素,混交林能够促进土壤中TN和TP的积累。

表3 不同深度土壤性质与C, N, P化学计量的相关性分析
Table 3 Correlation analysis between soil properties and C:N:P stoichiometry at different soil depths

土层/cm	指标	TN	SOC	TP	C:P	C:N	N:P
0—20	TN	1					
	SOC	0.87**	1				
	TP	0.35*	0.30*	1			
	C:P	0.84**	0.98**	0.10	1		
	C:N	-0.33*	0.14	-0.19	0.18	1	
	N:P	0.98**	0.86**	0.16	0.86**	-0.32*	1
20—40	TN	1					
	SOC	0.63**	1				
	TP	0.14	0.14	1			
	C:P	0.61**	0.98**	-0.08	1		
	C:N	-0.25	0.59**	0.02	0.58**	1	
	N:P	0.97**	0.60**	-0.11	0.63**	0.06	1
40—60	TN	1					
	SOC	0.77**	1				
	TP	0.25	-0.21	1			
	C:P	0.67**	0.98**	-0.41**	1		
	C:N	-0.20	0.47**	-0.66**	0.57**	1	
	N:P	0.97**	0.85**	-0.00	0.80**	-0.04	1
60—80	TN	1					
	SOC	0.64**	1				
	TP	0.37**	-0.10	1			
	C:P	0.52**	0.97**	-0.33*	1		
	C:N	-0.42**	0.40**	-0.57**	0.51**	1	
	N:P	0.97**	0.71**	0.14	0.64**	-0.31*	1
80—100	TN	1					
	SOC	0.63**	1				
	TP	0.14	-0.28*	1			
	C:P	0.54**	0.98**	-0.49**	1		
	C:N	-0.37**	0.48**	-0.48**	0.54**	1	
	N:P	0.96**	0.71**	-0.13	0.68**	-0.24	1

在本研究结果中,与对照样地相比,侧柏纯林土壤SOC和TN含量要显著低。这可能是由于侧柏属于针叶树种,其凋落物通常含有较高的单宁和木质素,分解速度较慢,导致碳积累减少。这与李明军等^[18]的研究结果一致。而土壤TN的降低则是由于

侧柏纯林林分内灌草植物分布较少,缺乏固氮树种,且乔木的深层根系可能通过淋溶或气体挥发导致氮损失^[19],而对照样地中的灌草种类多,分布广,草本植物凋落物分解迅速,加之部分豆科植物的生物固氮作用,向土壤持续输入活性氮,使得土壤TN含量升高。

在不同土层深度下,随着土层深度的增加,不同人工林类型的土壤SOC和土壤TN含量随之降低,这与张雨鉴等^[20]对滇中亚高山5种不同林分类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的研究结果相似。这是由于土壤中的C, N主要来源于植物根系、凋落物和动物残体,加之表层土壤透气性好,微生物活性强,使得养分聚集在土壤表层,但在受到雨水淋溶作用时会向土壤深层进行扩散,随着土层深度的增加,凋落物的分解产物逐渐减少。同时土壤微生物活性和植物根系活动也减少,从而导致土壤中C和N呈现出随土层深度的增加而减少的趋势^[21]。本研究中土壤TP含量没有表现出随着土层的增加而递减的趋势。这与青藏高原不同草地类型土壤养分分布规律^[22]及大别山马尾松不同林型土壤养分^[23]研究结果相似。土壤中P的含量不仅来自土壤有机质,还来源于岩石和矿物质的风化,其过程较为稳定,存在较小的空间异质性,导致土层深度对P的含量影响不显著^[24]。

3.2 不同类型人工林土壤C, N, P化学计量特征

土壤C, N, P化学计量特征是反映土壤养分循环、土壤发育过程中的营养状况及土壤质量和功能的重要指标。土壤C:P是衡量土壤有机质释放P或从环境中吸收固定P素的重要指标,C:P比值越高反映P的有效性越低^[25]。本研究发现山杏侧柏混交林的C:P显著较高,而侧柏纯林则显著较低,这与许窈孜等^[26]的研究结果相似,C:P在针阔混交林中较高而在针叶林中较低。其主要原因是由于山杏侧柏混交林枯枝落叶层种类较多,分解速度不同,使土壤中SOC固定速度高于P的输入,从而使C:P增高。而侧柏纯林内的凋落物主要以高木质素低磷的针叶为主,抑制了土壤中磷酸酶的活性,导致土壤中磷的释放受到限制,使土壤中积累的磷含量较高。同时林分内的凋落物种类单一,灌木和草本植物的种类和数量较少,使碳累积效率低于混交林,降低了林分内的C:P。土壤C:N通常用于评估土壤氮矿化效率,C:N越高则说明有机物分解越慢,氮有效性越低^[27]。对照样地C:N显著高于其他林分,由于对照样地是自然草地,只生长灌木和草本植物,灌草植物的根系寿命较短,根系分泌物增加了土壤有机碳的积累,但灌草植物自身对氮的高吸收需求,限制土壤无机氮的有效性,使得对照样地的C:N较高。土壤N:P是反

映土壤养分供给状况的重要指标,可以通过特定阈值来确定土壤养分是否受限,当 $N:P < 14$ 时,说明土壤N是植物生长的限制因子,当 $N:P > 16$ 时则土壤P是主要限制因子。本研究所有林分类型的 $N:P$ 均小于14,说明土壤N对林分生长的限制作用较大,此外山杏侧柏混交林的 $N:P$ 显著较高,这与土壤N含量在混交林中较高而在纯林中相对较低有一定的关系,同时这也说明山杏侧柏混交林中的土壤N较为充足,植物生长受N素影响较小。

在不同土层深度下林分内的土壤C, N, P化学计量呈现出差异性。本研究中山杏侧柏混交林的土壤C:P在0—40 cm表层土显著高于其他林分类型,并且随着土层深度的增加,各林分中的土壤C:P也有所下降,这表明土层深度的增加使得P的有效性下降,植物和微生物之间对P的竞争随之不断增加,导致深层土的C:P下降。在本研究中土壤C:P在表层土差异不明显且在各土层深度下变化趋势也不明显,这与朱秋莲等^[28]对黄土丘陵沟壑区不同植被土壤生态化学计量的研究结果相似,其原因可能是C, N在积累和消耗过程达到了相对平衡固定的关系,同时一些有机物在分解释放养分时其碳骨架破坏,在释放养分时C, N被同时释放,因此其变化差异不明显。

3.3 土壤性质与土壤化学计量比间的相关性

有研究表明,土壤中养分的循环和利用过程是相互影响相互耦合的^[29],土壤化学计量特征的影响因素不仅有林分类型、海拔、气候、地形等,同时还与土壤理化性质密切相关^[30]。在本研究中,不同林分类型下土壤 $N:P$ 与土壤SOC和TN呈显著正相关,这与喻林华等^[31]对亚热带不同林分类型凋落物和土壤化学计量特征的研究结果一致。土壤中大量凋落物的输入,其含有较高的N和C,分解速率较慢,导致N在土壤中积累,而凋落物中的P含量相对较低,并且P易被土壤中的矿物固定,最终使得土壤 $N:P$ 与TN和SOC呈显著正相关^[32]。除山杏侧柏混交林之外,其余林分中土壤TP与C:N呈显著负相关,且在油松纯林、侧柏纯林等林分中表现出显著差异。油松侧柏等针叶纯林的凋落物具有高单宁高木质素的特点。分解速率较慢,长期积累的高C:N凋落物导致土壤碳氮比升高。同时由于针叶凋落物本身P含量较低且分解过程中P释放有限,土壤TP随C:N的升高而下降^[33]。在不同土层深度下,土壤TN, SOC和TP与土壤化学计量比之间的关系具有一定的差异性。本研究结果显示在深层土壤中TP与C:P呈现出负相关关系,而SOC与C:N呈现正相关。相关研究表明深层土壤中因淋溶损失、矿物质

固定、植物根系吸收等原因使TP减少,导致TP与C:P呈负相关^[34],而表层土中的中硝化细菌的活跃促进了TN积累,但因植物残体和凋落物输入的SOC较高,导致C:N负相关;在深层土壤中则由真菌主导分解,促进了SOC与C:N正相关^[35]。

4 结论

(1) 山杏侧柏混交林0—100 cm土层土壤SOC, TN和TP含量最高,山杏侧柏混交林显示出显著的土壤养分富集效应。各类林地土壤SOC和TN含量随土层加深显著下降,而TP含量的垂直变化不显著,未表现出随深度递减规律。

(2) 不同林型化学计量特征呈现明显的分异。侧柏纯林0—100 cm土层的C:P, C:N和N:P均显著小于其他林分类型。山杏侧柏混交林的C:P和N:P显著提升。不同林型0—20 cm土层的C:P显著高于深土层($p < 0.05$),混交林土壤N:P高于纯林。

(3) 在不同人工林类型中土壤TN和SOC呈显著正相关,而在不同土层深度下TN和SOC则与C:P和N:P均呈显著正相关,土壤有机碳和氮的积累共同调控了土壤碳氮磷养分循环过程。

参考文献 (References)

- [1] 赵雯,黄来明.高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素[J].生态学报,2022,42(11):4415-4427.
Zhao Wen, Huang Laiming. Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(11):4415-4427.
- [2] Zeng Dehui, Chen Guangsheng. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(6):1007-1019.
- [3] Crovo O, Aburto F, Albornoz M F, et al. Soil type modulates the response of C, N, P stocks and stoichiometry after native forest substitution by exotic plantations [J]. Catena, 2021,197:104997.
- [4] Joshi R K, Garkoti S C. Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya [J]. Catena, 2023,222:106835.
- [5] Zhao Xinyu, Zhang Weiqiang, Feng Yingjie, et al. Soil organic carbon primarily control the soil moisture characteristic during forest restoration in subtropical China [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022,10:1003532.
- [6] Liu Jianguo, Gou Xiaohua, Gunina A, et al. Soil nitrogen pool drives plant tissue traits in alpine treeline eco-

- tones [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 477: 118490.
- [7] Du Enzai, Terrer C, Pellegrini A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221-226.
- [8] 蒋龙, 徐振锋, 吴福忠, 等. 亚热带3种典型常绿森林土壤和植物叶片碳氮磷化学计量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(4): 759-767.
- Jiang Long, Xu Zhenfeng, Wu Fuzhong, et al. Stoichiometric characteristics of C, N, and P in soil and plant leaves in three typical evergreen forest types in subtropical zone [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(4): 759-767.
- [9] 聂阳意, 王海华, 李晓杰, 等. 武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 748-756.
- Nie Yangyi, Wang Haihua, Li Xiaojie, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in low altitude and high altitude forests in Wuyi Mountains, southeastern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 748-756.
- [10] Hobbie S E. Plant species effects on nutrient cycling: Revisiting litter feedbacks [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(6): 357-363.
- [11] 丁颖, 刘小伟, 郭梁, 等. 黄土高原草地灌丛化对土壤有机碳、氮磷养分及酶活性的影响[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(5): 243-250.
- Ding Ying, Liu Xiaowei, Guo Liang, et al. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon, nitrogen and phosphorus nutrients, and enzyme activity in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(5): 243-250.
- [12] 张亚冰, 吕文强, 易武英, 等. 贵州月亮山5种森林类型土壤生态化学计量特征研究[J]. *热带亚热带植物学报*, 2016, 24(6): 617-625.
- Zhang Yabing, Lü Wenqiang, Yi Wuying, et al. Soil stoichiometry characterization of five forest types in Moon Mountain, Guizhou Province [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2016, 24(6): 617-625.
- [13] 朱奕豪, 刘晓丽, 陈为峰, 等. 黄河三角洲废弃盐田复垦土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 352-360.
- Zhu Yihao, Liu Xiaoli, Chen Weifeng, et al. Eco-stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in reclaimed area of abandoned salt pan in the Yellow River delta [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 352-360.
- [14] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 7996-8002.
- Li Jiajia, Fan Miaochun, Shanguan Zhouping. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 7996-8002.
- [15] 何高迅, 王越, 彭淑娴, 等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4425-4435.
- He Gaoxun, Wang Yue, Peng Shuxian, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [16] 陈佳仪, 代莹, 张乃莉. 中国森林树种多样性对土壤碳氮含量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2025, 47(2): 23-31.
- Chen Jiayi, Dai Ying, Zhang Naili. Effects of forest tree species diversity on soil carbon and nitrogen contents in China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2025, 47(2): 23-31.
- [17] 白昱欣, 刘润洪, 苏洁桦, 等. 树种混交对马尾松和红锥根际与非根际土壤微生物资源限制的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(23): 10770-10781.
- Bai Yuxin, Liu Runhong, Su Jiehua, et al. Effects of tree species mixing on bulk and rhizosphere soil microbial resource limitation in stands of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(23): 10770-10781.
- [18] 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 等. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤C、N、P化学计量特征及互作关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7772-7781.
- Li Mingjun, Yu Lifei, Du Mingfeng, et al. C, N, and P stoichiometry and their interaction with plants, litter, and soil in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different ages [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7772-7781.
- [19] Berthrong S T, Jobbágy E G, Jackson R B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation [J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(8): 2228-2241.
- [20] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山5种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 73-82.
- Zhang Yujian, Wang Keqin, Song Yali, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in subalpine of middle Yunnan Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(1): 73-82.
- [21] 郑晓霞, 葛楠, 刘艳萍, 等. 腾格里沙漠东北缘花棒群落

- 土壤C,N,P的化学计量特征[J].水土保持通报,2025,45(1):74-81.
- Zheng Xiaoxia, Ge Nan, Liu Yanping, et al. C, N, and P stoichiometry characterization in soil of *Hedysarum scoparium* community at northeastern edge of Tengger Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):74-81.
- [22] 顾振宽,杜国祯,朱炜歆,等.青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律[J].草业科学,2012,29(4):507-512.
- Gu Zhenkuan, Du Guozhen, Zhu Weixin, et al. Distribution pattern of soil nutrients in different grassland types and soil depths in the eastern Tibetan Plateau [J]. Pratacultural Science, 2012,29(4):507-512.
- [23] 秦娟,孔海燕,刘华.马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(2):68-76.
- Qin Juan, Kong Haiyan, Liu Hua. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forests [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016,44(2):68-76.
- [24] 冯德枫,包维楷.土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(2):400-408.
- Feng Defeng, Bao Weikai. Review of the temporal and spatial patterns of soil C:N:P stoichiometry and its driving factors [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017,23(2):400-408.
- [25] 崔志鹏,王菁华,陈玉婷,等.伏牛山南麓山茱萸人工林土壤碳氮磷及化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(4):908-915.
- Cui Zhipeng, Wang Jinghua, Chen Yuting, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus characteristics and stoichiometry of *Cornus officinalis* plantation at the southern foot of the Funiu Mountain [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(4):908-915.
- [26] 许窈孜,叶彩红,张耕,等.北江中下游不同林分类型土壤C、N、P生态化学计量特征[J].应用生态学报,2023,34(4):962-968.
- Xu Tiaozi, Ye Caihong, Zhang Geng, et al. Soil C, N and P stoichiometry in different forest stand types in the middle and lower reaches of the Beijiang River, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(4):962-968.
- [27] 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.
- Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8):3937-3947.
- [28] 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.
- Zhu Qiulian, Xing Xiaoyi, Zhang Hong, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly gully region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(15):4674-4682.
- [29] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(15):5594-5602.
- Gao Junliang, Luo Fengmin, Gao Yong, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(15):5594-5602.
- [30] 杨瑞,刘帅,王紫泉,等.秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨[J].土壤学报,2016,53(4):1037-1046.
- Yang Rui, Liu Shuai, Wang Ziquan, et al. Relationships between the soil enzyme activity and soil nutrients in forest soils typical of the Qinling Mountain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(4):1037-1046.
- [31] 喻林华,方晰,项文化,等.亚热带4种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征[J].林业科学,2016,52(10):10-21.
- Yu Linhua, Fang Xi, Xiang Wenhua, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in litter and soil of four types of subtropical stand [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016,52(10):10-21.
- [32] 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.
- [33] 李树斌,周丽丽,陈宝英,等.亚热带树种转换对林地土壤碳氮磷计量比的影响[J].森林与环境学报,2019,39(6):575-583.
- Li Shubin, Zhou Lili, Chen Baoying, et al. Effects of tree species transition on stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus in subtropical areas [J]. Journal of Forest and Environment, 2019,39(6):575-583.
- [34] Qiao Yang, Wang Jing, Liu Heming, et al. Depth-dependent soil C-N-P stoichiometry in a mature subtropical broadleaf forest [J]. Geoderma, 2020, 370:114357.
- [35] Xue Zhijing, Zhou Zhengchao, An Shaoshan. Changes in the soil microbial communities of different soil aggregations after vegetation restoration in a semiarid grassland, China [J]. Soil Ecology Letters, 2021,3(1):6-21.