

库布齐沙漠典型防护林土壤养分特征

王 涛¹，蒙仲举¹，党晓宏^{1,2}，何丽娟¹，贾瑞庭¹，李佳敏¹，侍世玲¹

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;
2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站,内蒙古 杭锦旗 017400)

摘要：以库布齐沙漠典型防护林为研究对象,通过测定不同防护林的土壤理化性状,评估该防护林系统的土壤改良效益,为库布齐沙漠防护林的管理与养护提供理论依据。结果表明:(1)库布齐沙漠防护林营建 15 年后,在植被改良的作用下,原有的流沙质量发生了明显改变。与流沙环境相比,研究区土壤的碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)含量分别提高了 243.95%,37.89%,108.84%,138.71%,118.77%,42.41%,45.77%。与其他类型植被相比,沙枣防护林 SOM、AK、TN 含量的增长幅度最大,增幅分别为 188.36%,151.84%,158.67%。樟子松防护林 AN 含量的增长幅度最大,增幅为 481.86%。土壤物理性状随土层的增加规律各异,与流沙环境相比,土壤含水量(SWC)与孔隙度(PV)变化较显著。(2)研究区土壤的 C/N 变化范围为 7.46~27.22;C/P 变化范围为 2.11~14.17;N/P 变化范围为 0.07~0.62。植被类型、土壤深度及二者的交互作用均极显著的影响土壤质量及化学计量特征,植被恢复主要受氮含量的限制。(3)通过冗余分析可知,土壤含水量和孔隙度与防护林土壤养分及化学计量特征相关性较显著,也是影响库布齐沙漠防护林土壤养分和化学计量特征的主要环境因子。研究结果可为评价库布齐沙漠防护林体系土壤改良效益提供数据支撑。

关键词：库布齐沙漠；防护林；土壤养分；化学计量特征

中图分类号：S151.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2022)01-0325-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.041

Soil Nutrient Characteristic of Typical Shelterbelt in Hobq Desert

WANG Tao¹, MENG Zhongju¹, DANG Xiaohong^{1,2},
HE Lijuan¹, JIA Ruiting¹, LI Jiamin¹, SHI Shiling¹

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;
2.Notional Observation and Research Station of Inner Mongolia Hangjin Desert Hongjin, Banner, Hangjinqi, Mongolia 017400)

Abstract: Taking the typical shelter forest in Hobq Desert as the object, the physical and chemical properties of soil in different forests were measured to evaluate the soil improvement benefits of the shelter forest system and provide theoretical support for the management and maintenance of shelter forest in Hobq Desert. The results showed that: (1) 15 years after the establishment of the Hobq Desert Shelter Forest, the original quicksand texture had changed significantly due to the effect of vegetation improvement. Compared with the quicksand environment, the contents of soil AN, AP, AK, SOM, TN, TP and TK increased by 243.95%, 37.89%, 108.84%, 138.71%, 118.77%, 42.41% and 45.77%, respectively. Compared with other types of vegetation, the contents of SOM, AK and TN in *Elaeagnus angustifolia* shelter forest increased the most, with the increase of 188.36%, 151.84% and 158.67%, respectively. The AN content in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* shelterbelt had the largest increase, with an increase of 481.86%. The physical properties of soil showed different rules with the increasing of soil layers. Compared with the quicksand environment, soil water content (SWC) and porosity (PV) changed significantly. (2) The variation ranges of C/N, C/P and N/P in this area were 7.46~27.22, 2.11~14.17 and 0.07~0.62, respectively. Vegetation type, soil depth and the interaction between them significantly affected soil quality, and vegetation restoration process in this study

area was mainly limited by nitrogen content. (3)The redundancy analysis showed that the SWC and PV had significant correlation with the soil nutrients and stoichiometric characteristics of the shelter forest, and they were also the main environmental factors that affected the soil nutrients and stoichiometric features of the Hobq Desert Shelterbelt. These results could provide data support for evaluating the soil improvement benefits of the Shelter Forest System in Hobq Desert.

Keywords: Hobq Desert; shelter forest; soil nutrient; stoichiometric characteristics

防护林作为沙漠生态防护的重要措施,是改善和控制荒漠化最常见和有效的方法之一,其可以有效地缓解区域生态环境的恶化,对当地荒漠生态系统的可持续发展具有重要的意义。防护林具有降低风速、抑制粉尘释放^[1]、增加地面植被盖度^[2]、改变风速流场、加速林内气流循环、改善周边小环境等方面的作用。同时,在荒漠化防治的过程中,以流沙治理为目的而营建形成的不同植物群落类型,其生长过程也逐步改善土壤养分。

土壤养分作为土壤特性的综合反映,也是揭示土壤条件动态最敏感的指标,能够较全面反映土壤的状况,是衡量生态环境功能和结构的关键指标^[3]。已有研究^[4]表明,土壤养分与植被类型密切相关,不同的植被类型在土壤的养分循环、能量转化、物质储存等方面存在较大差异。因此,准确评价防护林土壤养分状况并找出限制因素,对生态恢复、植被预测和实现可持续经营具有重要意义。张智勇等^[5]在对退耕还林后主要植被土壤质量的研究中发现,研究区 3 种类型的防护措施中,相比乔木林和草地,灌木林对土壤养分的改良效果较好。李从娟等^[6]在塔克拉玛干沙漠腹地人工植被的研究中发现,塔克拉玛干沙漠土壤 C、N、P 含量极少,土壤养分极为贫瘠,其中 N 贫乏更为严重,制约着当地的植被恢复。海旭莹等^[7]研究也发现,土壤生态计量特征影响生态系统的结构与稳定性。以往针对本研究区的研究主要集中于防风固沙^[8]、生态水文^[9]、生态演替^[10]等方面,而对于植被恢复过程中土壤养分特

征的研究较少。因此,本文针对库布齐沙漠 4 种典型的防护林土壤养分特征进行研究,旨在揭示库布齐沙漠不同类型防护林土壤质量状况,为库布齐沙漠防护林的管理与养护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于库布齐沙漠东北缘,鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇(37°20′00″—39°50′00″N,107°10′00″—111°45′00″E),属半干旱区域,典型温带大陆性季风气候。该区域年均降水量 258 mm,年平均气温为 5~8 ℃,年蒸发量为 2 400 mm。风沙活动主要集中于 3—5 月,盛行西北风和西风,全年大风日数约 30 天。地貌以固定沙地、流动及半固定沙丘为主,土壤类型为风沙土。防护林主要树种为二白杨(*Populus gansuensis*)、沙柳(*Salix psammophila*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)及樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)。林下植被以沙生植被为主,见表 1。试验林周边无村民居住,除管护人员进行正常的经营管理活动外,基本无其他干扰。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 试验于 2020 年 8 月初在研究区开展。分别调查区域内 2005 年营建的二白杨纯林、沙柳纯林、沙枣纯林及樟子松纯林株高、冠幅、株行距、植被盖度和林下调落物等数据,样地基本特征见表 1,样地林下调落物特征见表 2。

表 1 研究样地基本特征

林分 类型	密度/ (株·hm ⁻²)	株高/ m	胸径/ cm	郁闭度	株行距/ m	冠幅/ m	更新 状况	林下植被及盖度
二白杨	480	7.5	20	0.4	4.2×3.9	4.6×4.5	有	苦豆子(<i>Sophora alopecuroides</i>)、甘草(<i>Glycyrrhiza uralensis</i>)、沙米(<i>Agriophyllum squarrosum</i>),盖度约为 45%
沙柳	450	3.0	2	0.3	2.9×1.5	3.2×1.5	有	苦豆子、猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)、沙蒿(<i>Artemisia desertorum</i>)、雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>),盖度约为 35%
沙枣	430	6.5	15	0.5	4.3×2.5	4.5×2.9	少量	蒙古虫实(<i>Corispermum mongolicum</i>)、戟叶鹅绒藤(<i>Cynanchum sibiricum</i>),盖度约为 30%
樟子松	500	5.5	15	0.6	2.9×2.6	3.2×2.7	少量	苦豆子、猪毛菜、沙蒿、雾冰藜、虫实,盖度约为 40%

1.2.2 土样采集与测定 在前期植被调查的基础上,每种林分设置 3 个 30 m×30 m 的样地,于 2020 年 8 月中旬在每个样地内随机布设 3 个土壤取样点,每个取样点分别按 0—10,10—20,20—30,30—40,

40—50 cm 土层采集样品,选取样地外流沙作为试验对照(CK)。土壤样品经实验室自然风干,除去植物根系和石块,分别过 10 目(2 mm 孔径)、100 目(0.15 mm 孔径)土壤筛,用于土壤速效及全量养分的测定。

土壤样品养分含量及物理性质均采用常规分析方法^[11]测定。

1.2.3 数据分析 用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件对数据进行分析与统计,用单因素方差分析(One-way ANOVA)不同植被类型及不同土层深度各养分

指标的差异显著性,土层深度、植被类型及二者的交互作用采用多因素方差分析(Two-way ANOVA)。采用 Canoco 4.5 软件进行冗余分析(RDA),用 Origin 2017 软件进行绘图。用变异系数(CV)来衡量土壤养分的变异情况。

表 2 防护林林下凋落物特征

林分类型	未分解层			半分解层			凋落物层	
	厚度/ cm	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	比例/ %	厚度/ cm	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	比例/ %	厚度/ cm	蓄积量/ (t·hm ⁻²)
二白杨	1.5	18.48	53.78	0.6	15.89	46.22	2.1	34.37
沙柳	1.2	3.39	43.91	0.5	4.32	56.09	1.7	7.71
沙枣	0.9	4.46	36.22	0.3	7.86	63.78	1.2	12.33
樟子松	0.6	7.46	36.66	0.2	12.89	63.34	0.8	20.35

2 结果与分析

2.1 不同防护林土壤理化特征分析

不同防护林及不同土层的土壤理化特征见图 1。4 种林分土壤表层(0—10 cm)养分含量均表现出一定的表聚效应,养分含量均表现为随土层深度的递增而减少。二白杨、沙柳、沙枣、樟子松防护林表层(0—10 cm)土壤全氮(TN)、有机质(SOM)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)含量均显著高于 10 cm 以下土层($P<0.01$),较 10 cm 以下土层均值,TN 含量分别增加了 2.07,3.47,2.69,1.91 倍;SOM 含量分别增加了 1.64,2.45,5.27,1.56 倍;AN 含量分别增加了 1.58,2.16,3.84,1.44 倍;AK 含量分别增加了 1.95,1.44,1.32,1.54 倍。4 种防护林表层土壤(0—10 cm)全磷(TP)、全钾(TK)、速效磷(AK)含量较 10 cm 以下土层均值差异不显著($P>0.05$)。4 种防护林土壤含水量(SWC)、容重(BD)和孔隙度(PV)规律各异。土壤含水量和孔隙度均表现为随土层深度的递增而增加的趋势,容重随土层深度的递增变化不明显。

由表 3 可知,二白杨防护林 AN 和 TN,沙柳防护林 AN、AP 和 TN,沙枣防护林 SOM、AN 和 AP 以及樟子松防护林 AN 均属于中等变异,土层含水量、孔隙度和容重属于弱变异。将植被类型、土壤深度及两者的交互作用进行双因素方差分析可知,植被类型及土层深度极显著的影响土壤养分,两者的交互作用也极显著地影响土壤 SOM、AK、TN 含量($P<0.001$)。土层深度对 SOM、AP、AK、TN 含量的影响作用大于植被类型,植被类型对 AN 及 TP 含量的影响作用大于土层深度(表 4)。

2.2 不同防护林土壤化学计量特征分析

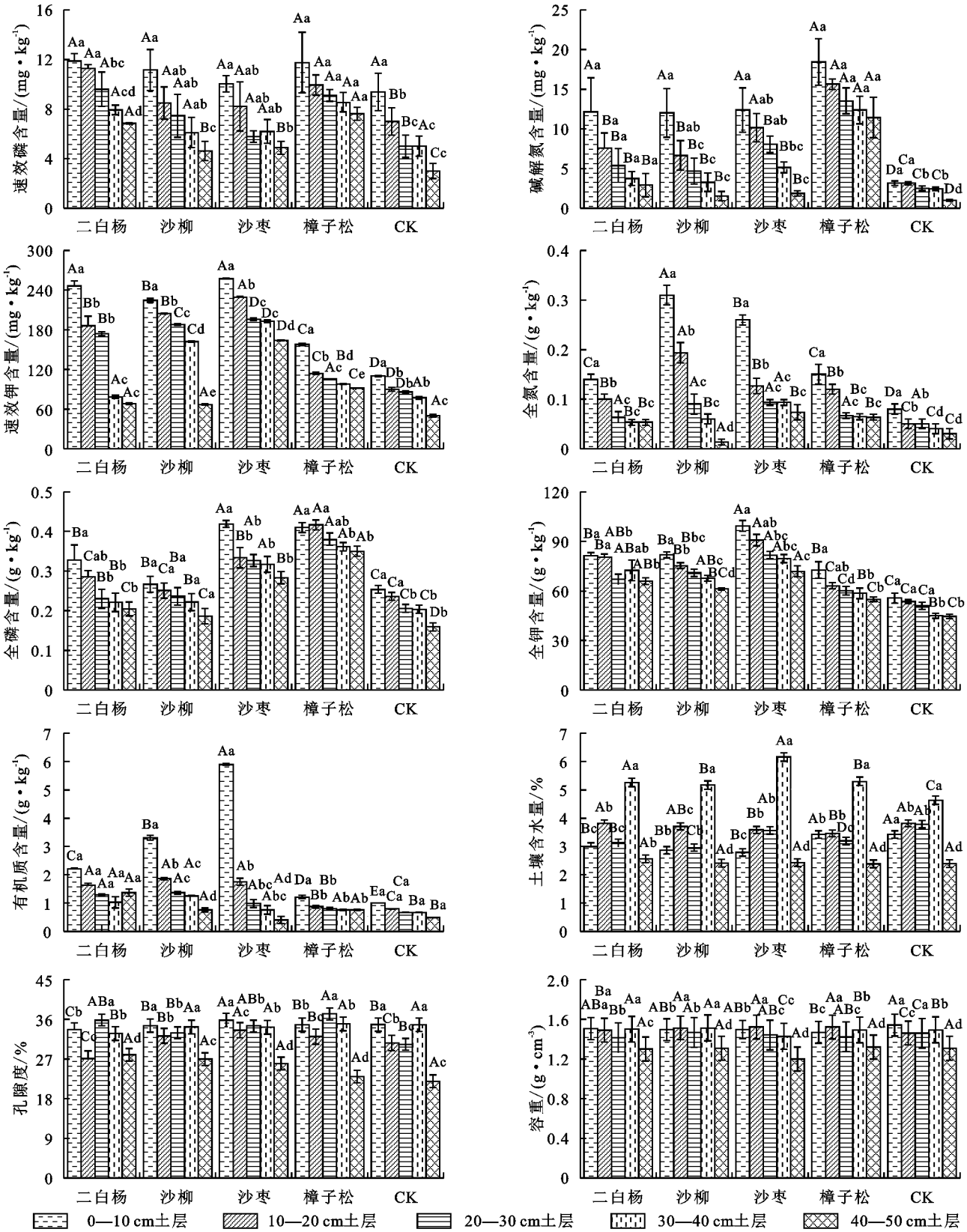
由图 2 可知,除沙枣防护林外,其他防护林 C/N 随着土层深度的增加均呈现逐渐升高的趋势。二白杨、沙柳、沙枣和樟子松防护林土壤的 C/N 变化范围分别为

15.54~23.57,9.45~27.22,8.59~22.85,7.46~12.87。二白杨、沙柳防护林防护林底层土壤(40—50 cm)C/N 显著高于表层土壤(0—10 cm)($P<0.01$),分别增加了 1.41,6.36 倍。但沙枣和樟子松林变化截然相反,底层土壤(40—50 cm)C/N 显著低于表层土壤(0—10 cm)($P<0.01$)。C/P 表现为随着土层深度的增加而减小,二白杨、沙柳、沙枣和樟子松防护林土壤的 C/P 变化范围分别为 5.44~6.83,4.51~12.33,2.45~14.17,2.11~3.12,N/P 的变化范围分别 0.24~0.43,0.07~1.16,0.26~0.62,0.17~0.36。4 种防护林中,沙柳、沙枣和樟子松防护林 C/P 和 N/P 的表层土壤(0—10 cm)均显著高于 10 cm 以下土壤($P<0.01$)。

由表 3 可知,除樟子松防护林土壤 C/P 外,其他防护林各生态化学计量比均属于中等变异。由表 4 双因素方差分析可知,植被类型、土层深度及二者的交互作用也均极显著地影响土壤化学计量比。

2.3 土壤理化性质的相关性分析

为探究库布齐沙漠典型防护林与环境因子的相关性,本研究将土壤养分及化学计量特征与物理性状进行冗余分析。由图 3 可知,二白杨、沙柳、沙枣和樟子松第 1 轴和第 2 轴的累积解释量分别为 95.0%,98.3%,93.1%和 97.1%。由此可知,前 2 轴可以较好地反映土壤养分及化学计量特征与物理性质的关系。从土壤化学计量特征的相关性来看,4 种防护林 C/P 和 N/P 与土壤养分均呈正相关,且 N/P 的相关性强于 C/P,C/N 与土壤养分呈负相关;从环境因子的相关性来看,除沙枣防护林外,其他防护林 PV 和 SWC 与大部分土壤养分及化学计量呈负相关,且 SWC 相关性强于 PV,BD 与大部分养分指标呈正相关。从 4 种防护林的土壤养分与环境因子的 RDA 排序中可知,影响研究区土壤养分转化的环境因子大小依次为 $SWC>PV>BD$ 。



注:图柱上方不同大写字母表示同一土层深度不同林分之间存在显著差异($P<0.05$);不同小写字母表示同一林分不同土层深度之间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

图 1 不同林分土壤理化性质

3 讨论

本研究区土壤 SOM、TN、TP 含量分别在 0.68~5.94、0.01~0.31、0.19~0.42 g/kg,均低于中国典型

风沙区均值 12.2,1.2,0.8 g/kg^[12]。土壤有机质和凋落物的分解是土壤 C 和 N 的主要来源,由于本研究区干旱、风沙活动频繁的环境,导致本研究区凋落物较少,有机质分解缓慢,致使 SOM 含量偏低,这与沈

亚萍等^[13] 和刘进辉等^[14] 的研究结果相似,沙区恶劣的条件制约了该区域土壤 C 的循环。但本研究区 SOM 含量略高于塔里木沙漠相近年份的防护林土壤有机质含量(0.80~1.38 g/kg),这可能是防护林类型的差异造成的,与塔里木沙漠防护林相比,本研究区中沙柳与沙枣防护林对土壤 SOM 含量的贡献较大^[15]。本研究区 TN 含量同样也低于科尔沁沙地防护林(0.4~0.75 g/kg)^[16],这主要是由于林龄的差异造成的,科尔沁沙地防护林平均建营建年限为 35 年,远高于本研究区防护林营建年限。本研究

区 TP 含量与黄土高原丘陵区同林龄防护林 TP 含量(0.37~0.45 g/kg)基本持平^[17],这可能是由于两地处于同一气候区,海拔、降水、温湿度等外部条件对成土过程的影响作用相似。

本研究中樟子松防护林的土壤含水量显著高于其他防护林,这是由于樟子松具有较强的抗旱性^[18],且随着干燥度增大,生长优势更加明显。4 种防护林的土壤容重均低于流沙,这主要是由于防护林根系降低土壤密度,增加土壤孔隙度间接提高饱和导水率,继而导致土壤的容重降低^[19]。

表 3 不同林分土壤养分及其生态化学计量比变异系数												单位: %	
植被类型	有机质	碱解氮	速效磷	速效钾	全氮	全磷	全钾	含水量	容重	孔隙度	C/P	C/N	N/P
二白杨	6.75	34.91	5.62	3.58	11.41	9.33	4.22	4.23	7.05	4.34	10.22	10.90	17.15
沙柳	3.42	32.63	18.05	0.82	19.88	8.93	2.30	3.27	7.99	5.52	11.06	16.51	23.85
沙枣	19.34	16.72	12.96	0.62	9.82	5.23	3.56	3.94	9.41	3.94	21.77	24.06	10.74
樟子松	4.47	13.80	9.99	0.86	9.71	3.31	4.43	3.96	8.74	4.53	3.65	12.42	11.87

注:变异系数 CV≤10% 为弱变异;10%≤CV≤100% 为中等变异;CV≥100% 为强变异。

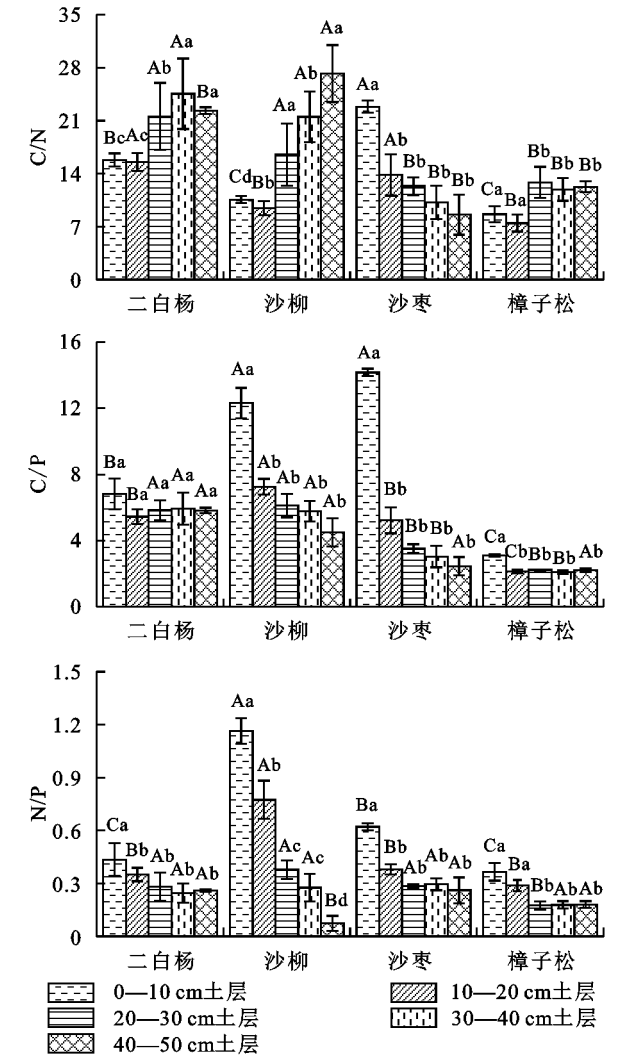


图 2 不同林分土壤化学计量特征

本研究区 C/N、C/P 以及 N/P 的均值分别为 10.26~21.63,3.63~9.11,0.19~0.65,C/N 高于中国

典型风沙区均值 12.3,其余均低于中国典型风沙区均值 15.7,1.63^[12]。C/N 指标主要评价土壤中的 SOM、TN 循环,其平均值约为 10~12,当 C/N 比较高时,其有机质的分解速率较慢;反之,当 C/N 比较低时,土壤分解会释放 N 素,增加土壤中的 N 元素含量^[20]。4 种防护林中二白杨、沙柳、沙枣防护林 C/N 高于中国典型风沙区均值,可能是这 3 种防护林有机质的分解较缓慢,限制了养分循环的速度。而樟子松防护林 C/N 表层土壤低于我国平均值,说明樟子松防护林表层土壤氮素转化累积效率较高。C/P 是衡量磷有效性的重要指标之一,C/P 比较低时,磷的有效性较高;反之,则磷的有效性较低。本研究中,4 种防护林的 C/P 均远低于我国的平均值,表明本研究区土壤磷表现为净矿化,磷的有效性较高。TN 和 TP 是植物生长必须的营养元素,可用作 N 元素饱和的诊断指标^[21],并被用于确定养分限制的阈值,本研究 4 种防护林 N/P 也均远低于中国典型风沙区均值,这充分证明了本研究区生态恢复过程中,植被生长严重受限于氮素的含量。

土壤是一个复杂的系统,其理化性质相互影响、相互作用,冗余分析可以较清晰地揭示土壤物理性状与养分特征及化学计量特征之间的协调关系,对土壤养分具有较好的解释作用。土壤含水量作为土壤养分循环和转移的载体,对土壤养分转化具有重要意义。本研究中,土壤含水量与土壤养分特征等呈显著负相关,这与董正武等^[22]关于通古特沙漠西南缘怪柳沙包表层土壤的研究一致,可能是土壤 C

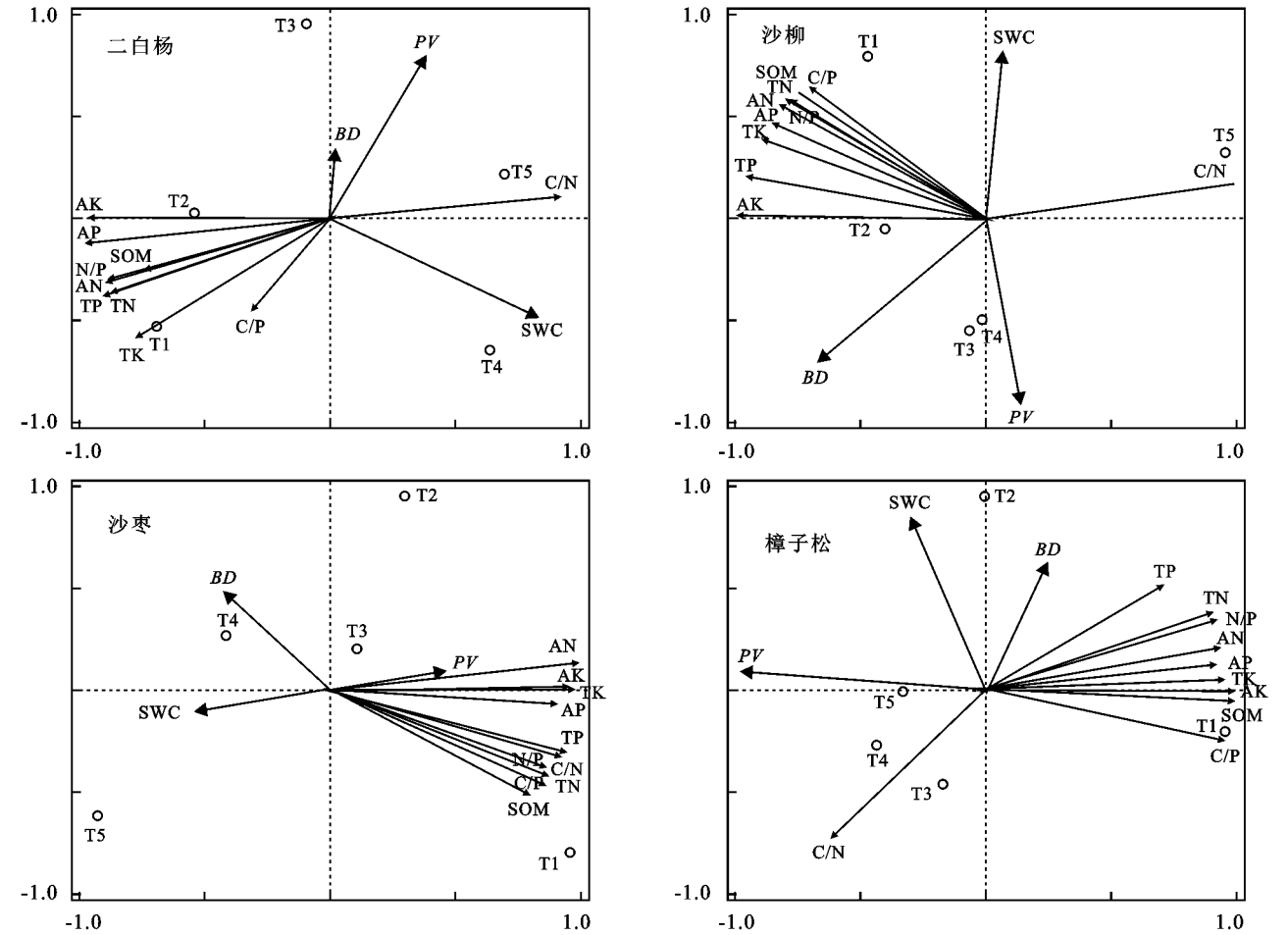
和 N 在温度、蒸发等气候因素的影响下循环受阻。植物根系的生长和发育可以增大土壤的孔隙度,增强土壤的水热交换能力、透气能力及微生物的分解作用,但由于本研究区土壤结构性较差,土壤较为紧实,对植物根系吸收水分和养分的影响较大。土壤化学计量是评判土壤养分循环与平衡的重要参数,表征土壤质量的重要指标。本研究中,土壤养分元素

与化学计量特征之间大部分存在一定的相关关系,这与以往的研究^[23-24]相似。这在一定程度上体现了土壤养分的内在耦合与平衡机制。但与先前研究^[23-24]不同的是,本研究中,C/N 与大部分土壤养分元素及土壤化学计量比呈负相关,这与陶冶等^[25]的研究结果相似,主要是由于研究区生态环境恶劣,限制了养分的分解与转化。

表 4 植被类型和土层深度与土壤理化性质、C : N : P 化学计量比的双因素方差分析

因素	F 值												
	有机质	碱解氮	速效磷	速效钾	全氮	全磷	全钾	含水量	容重	孔隙度	C/P	C/N	N/P
A	154.636 ***	38.784 ***	12.512 ***	995.837 ***	66.667 ***	103.024 ***	43.881 ***	45.223 ***	97.78 ***	36.221 ***	98.794 ***	26.161 ***	79.067 ***
B	440.522 ***	25.706 ***	25.742 ***	1155.708 ***	359.511 ***	58.644 ***	43.844 ***	57.661 ***	42.131 ***	37.996 ***	87.473 ***	18.642 ***	136.707 ***
A×B	101.672 ***	0.441 ***	0.536 ***	108.647 ***	32.681 ***	1.805 ***	1.190 ***	1.150 ***	1.121 ***	1.337 ***	21.940 ***	20.112 ***	29.699 ***

注:A 表示植被类型,B 表示土层深度,A×B 表示植被类型和土层深度的交互作用; * * * 表示 $P<0.001$ 的显著水平。



注:图中 SWC、BD、PV、AN、AP、AK、SOM、TN、TP、TK 分别为土壤含水量、土壤容重、土壤孔隙度、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、全效氮、全效磷、全效钾;空心圆点代表不同深度取样点。

图 3 不同类型植被土壤养分与环境因子的 RDA 排序

4 结论

(1)库布齐沙漠防护林营建 15 年后,对土壤全氮、有机质、碱解氮和速效钾、土壤含水量和孔隙度改良作用较显著,且各养分指标均表现出不同程度的表聚效应。

(2)库布齐沙漠各林分土壤养分及土壤化学计量

比受植被类型和土层深度的综合影响。其中,C/N 高于中国典型风沙区均值,C/P 和 N/P 均低于中国典型风沙区均值,由土壤化学计量特征可知,研究区植被恢复主要受氮含量的限制。

(3)库布齐沙漠防护林土壤物理性状和土壤养分特征及化学计量比存在不同的相关关系,其中,土壤

含水量、孔隙度和 N/P 与土壤养分及化学计量比呈显著负相关,由此可知,含水量、孔隙度和 N 含量是影响研究区土壤养分转化的主要因素。

参考文献:

[1] 党晓宏,魏亚娟,蒙仲举,等.乌兰布和沙漠东北缘不同下垫面降尘特征研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(5):1122-1133.

[2] 杨玉婷,石玉林,李战刚,等.陕北“三北”防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系[J].生态学报,2020,40(18):6542-6551.

[3] 陈美军,段增强,林先贵.中国土壤质量标准研究现状及展望[J].土壤学报,2011,48(5):1059-1071.

[4] 濮阳雪华,王月玲,赵志杰,等.陕北黄土区不同植被恢复模式植被与土壤耦合关系研究[J].草业学报,2021,30(5):13-24.

[5] 张智勇,刘广全,艾宁,等.吴起县退耕还林后主要植被类型土壤质量评价[J].干旱区资源与环境,2021,35(2):81-87.

[6] 李从娟,雷加强,徐新文,等.塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 CNP 的化学计量特征[J].生态学报,2013,33(18):5760-5767.

[7] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,等.黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J].生态学报,2020,40(23):8570-8581.

[8] 肖南,董治宝,南维鸽,等.1957—2014 年库布齐沙漠地面风场特征[J].中国沙漠,2018,38(3):628-636.

[9] 王涛,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠人工防护林林下枯落物及土壤水文效应研究[J].生态环境学报,2021,30(4):700-707.

[10] 王博,段玉玺,王伟峰,等.人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征[J].干旱区研究,2020,37(4):881-889.

[11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[12] 孙小东,宁志英,杨红玲,等.中国北方典型风沙区土壤

碳氮磷化学计量特征[J].中国沙漠,2018,38(6):1209-1218.

[13] 沈亚萍,张春来,李庆,等.东部沙区表土有机质和速效养分与风沙环境关系初探[J].干旱区地理,2017,40(1):77-84.

[14] 刘进辉,王雪芹,马洋.沙漠绿洲过渡带怪柳灌丛沙堆—丘间地系统土壤养分空间异质性[J].生态学报,2016,36(4):979-990.

[15] 王迎菊,靳正忠,雷加强,等.人工防护林对风沙土有机碳动力学的的影响[J].干旱区研究,2017,34(3):495-503.

[16] 雷虹.科尔沁沙地主要防护林碳氮磷化学计量特征[D].辽宁 阜新:辽宁工程技术大学,2019.

[17] 赵赫然,王辉,黄蓉.华家岭防护林带土壤理化特性研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):139-144.

[18] 宋立宁,朱教君,康宏樟.樟子松幼苗水力结构参数和生长特征对模拟降水梯度的响应[J].干旱区研究,2013,30(6):1021-1027.

[19] 孙丽,刘廷玺,段利民,等.科尔沁沙丘一草甸相间地区表土饱和导水率的土壤传递函数研究[J].土壤学报,2015,52(1):68-76.

[20] 王亚东,魏江生,周梅,等.大兴安岭南段杨桦次生林土壤化学计量特征[J].土壤通报,2020,51(5):1056-1064.

[21] Yang X C, Ling C, Zhang Q, et al. Research progress in the effect of C/P ratio on soil phosphorus availability[J]. Hans Journal of Soil Science,2019,7(1):10-15.

[22] 董正武,玉米提·哈力克,李生字,等.古尔班通古特沙漠西南缘怪柳沙包的土壤化学计量特征[J].生态学报,2020,40(20):7389-7400.

[23] 董雪,辛智鸣,黄雅茹,等.乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(17):6247-6256.

[24] 宁志英,李玉霖,杨红玲,等.沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J].生态学报,2019,39(10):3537-3546.

[25] 陶冶,吴甘霖,刘耀斌,等.古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J].中国沙漠,2017,37(2):305-314.