

平原造林工程影响下的河岸带土壤生态化学计量特征

王莹¹, 王西涵¹, 刘云¹, 梁琼¹, 徐艳², 石生伟¹

(1.北京农学院, 农业农村部华北都市农业重点实验室, 北京 102206; 2.中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要: 北京主要河流河岸带实施平原造林工程后, 对河岸带植被类型及土壤造成不同程度影响。研究河岸带原有及重建植被类型土壤生态化学计量特征, 对河岸生态系统土壤碳氮磷平衡及固碳潜力提升提供科学依据。选取北京温榆河昌平段岸边原有植被类型 3 种样地(乔木林、乔灌木及草地), 重建植被类型 2 种样地(乔木林与灌木林), 共 15 个样方, 采集 3 层(0—10, 10—20, 20—30 cm)土壤样品, 分析并计算碳(C)、氮(N)和磷(P)含量及计量比。结果表明: 原有与重建植被类型的土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量分别为 3.810~10.320, 0.223~0.700, 0.551~0.692 g/kg, C/N、N/P、C/P 分别为 11.592~25.373, 0.373~1.022, 5.662~15.493; SOC 与 TN 均在表层聚集, 且同 N/P、C/P 一样表现出随土层深度增加而减少趋势, C/N 反之, TP 受土层深度影响较小; 原有植被类型(乔木林)土壤 SOC 和 TN 均高于其他植被类型, 在 10—20, 20—30 cm 土层间 C/N、C/P 均显著低于其他植被类型($P < 0.05$); 原有植被类型(草地)在 0—10 cm 土层间 N/P 最低; 重建植被类型(乔木林)土壤 TP 含量显著低于其他植被类型; 重建植被类型(灌木林)C/N 显著高于其他植被类型。研究结果揭示了研究区土壤 N 素为植物生长的限制元素, 乔木、乔灌木下土壤有机质释放更多, P 有效性更高, 固碳潜力强; 重建植被类型有机质矿化较慢, 固磷能力更强。因而, 建议温榆河河岸带采用乔木纯林和乔灌木混交模式来积累土壤有机质, 提高河岸带生态系统土壤质量及固碳潜力。

关键词: 土壤生态化学计量; 土壤理化性质; 植被类型; 平原造林; 河岸带

中图分类号: S714.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0188-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.027

Ecological Stoichiometric Characteristics of Riparian Soils Affected by Plain Afforestation Projects

WANG Ying¹, WANG Xihan¹, LIU Yun¹, LIANG Qiong¹, XU Yan², SHI Shengwei¹

(1. Beijing University of Agriculture, Key Laboratory for Northern Urban Agriculture of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 102206;

2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: After Beijing implemented plain afforestation projects in the riparian zones of major rivers, the vegetation types and soils in the riparian zones have been affected to varying degrees. The study of soil ecological stoichiometry characteristics of the original and reconstructed vegetation types in the riparian zone provides scientific basis for the soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) balance and the improvement of the C sequestration potential of the riparian ecosystem. Total 3 original vegetation types (arbor forest, arbor-shrub mixed forest and grassland) and 2 reconstructed vegetation types (arbor forest and shrub forest) were selected as experimental samples at 15 sites of Beijing Wenyu River Changping riparian zone. Soils were sampled at 3 layers (0—10, 10—20, 20—30 cm), and analyzed for the contents and measurement ratios of C, N and P. The results showed that the ranges of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) of the original and reconstructed vegetation types were 3.810~10.320, 0.223~0.700, 0.551~0.692 g/kg respectively, C/N, N/P, and C/P were 11.592~25.373, 0.373~1.022, 5.662~15.493

收稿日期: 2021-09-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(40871232); 首都科技创新券(20210720797679); 北京市自然科学基金—教委联合重点项目(KZ201810020025); 北京市自然科学基金项目(8192007); 北京农学院学位与研究生教育改革与发展项目(2021YJS019)

第一作者: 王莹(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: estyingzjiang@163.com

通信作者: 刘云(1971—), 女, 教授, 博士, 主要从事景观生态及土地持续利用研究。E-mail: housqly@126.com

respectively. Both SOC and TN were concentrated in the surface layer, and like N/P and C/P, they decreased with the increases of soil depth, while the C/N was on the contrary. TP was less affected by the change of soil depth. The SOC and TN in the original vegetation types (arbor forest) were higher than the others. The C/N and C/P at 10–20 and 20–30 cm soil layers were significantly lower than the others ($P < 0.05$). The N/P of original vegetation types (grassland) was the lowest at 0–10 cm soil layer. The soil TP content of reconstructed vegetation type (arbor forest) was significantly lower than those of the other vegetation types. The C/N of reconstructed vegetation types (shrub forest) was significantly higher than the others. The study revealed that the soil N was the limiting factor for plant growth. Arbor and arbor-shrub mixed forest released more soil organic matter, had the higher levels of P availability, and had strong carbon sequestration potential. The re-vegetation types had the slower organic matter mineralization and stronger phosphorus fixation capacity. Thus, it's recommended that the mixed mode of pure forest and arbor-shrub mixed could accumulate soil organic matter and improve the soil quality and carbon sequestration potential of riparian ecosystems in the Wenyu River riparian zone.

Keywords: soil ecological stoichiometry; soil physical and chemical properties; vegetation types; plain afforestation; riparian zone

2012年北京市提出百万亩平原造林工程后,城市生态绿地总量和碳汇功能持续提升,为北京市碳中和与生态环境改善提供了强有力支撑。2016年对温榆河、永定河等北京市重要流域河岸带两侧绿化带的荒滩荒地进行了植被群落重建,使植被覆盖类型发生变化,改变了土壤环境质量,且造成不同程度的差异,这种差异对植被生长发育以及土壤固碳潜力会产生一定的影响^[1-2]。

河岸带生态系统中的土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)生物化学循环过程,对元素间循环与平衡机制有极大的影响,且对揭示养分的可获得性有着重要的意义。生态化学计量学(ecological stoichiometry)通过对C、N、P为主的多重化学元素质量分析来确定土壤养分矿化与固持作用平衡特征^[3-4]。C、N、P作为土壤养分循环与转化的主要元素,在植物生长发育过程中充当重要的角色,因此,了解土壤养分循环过程间的化学计量变化,对评价人工植被恢复过程中土壤养分状况和可持续发展具有重要意义^[5]。近年来,已有众多学者对平原造林后的土壤环境进行了相关探究,刘硕等^[6]研究表明,北京永定河延河植被类型结构单一,典型受损沙区土壤N、P等养分含量低,严重制约植被生长;郭二辉等^[7]指出,温榆河河岸带植被类型与组成、土壤理化性质等都会影响土壤N、P的富集、迁移、转化过程;彭栋等^[8]研究表明,北京地区平原造林立地条件相差较大且各地限制因子不同,土壤质量普遍低下;郑永林等^[9]研究表明,在0–20 cm土层中,树种对土壤有机碳、全氮和全磷浓度影响显著,在20–40 cm土层中,树种对土壤全氮浓度有显著影

响;李宸宇等^[10]研究发现,平原造林是北京市森林碳储量变化的主要原因,人工杨树林固碳效率尤为突出,远远高于其他优势树种。

鉴于此,目前针对平原造林河岸带原有与重建植被类型下的土壤C、N、P平衡机制的研究未见报道,因而,本研究通过对温榆河河岸带平原造林工程实施前后原有与重建的不同植被类型土壤进行野外调查采样及分析,探索原有及重建不同植被类型对土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)及其化学计量比特征的影响,分析与揭示土壤SOC、TN、TP及其计量比相互间的关系,为河岸带不同植被生态系统土壤环境质量及固碳能力的提高提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

温榆河又被称为北京市的“母亲河”,位于北京市东北部(116°20′48″–116°29′21″E, 40°07′49″–40°08′18″N),海拔42.9 m,属于北运河水系,流经昌平、海淀、顺义、朝阳和通州5个区,全长约47.5 km,流域面积2 478 km²。温榆河流域属于典型暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,降雨主要集中在6–8月,研究区域土壤主要为沙壤土,土壤的pH为7.2~8.8。在北京市实施了百万亩平原造林工程后,温榆河昌平段河岸带以原有护岸树木为主体,林下增加地被,局部区域补种乔、灌木,主要乔木树种包括国槐(*Sophora japonica*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、碧桃(*Amygdalus*

persica f. atropurpurea)、毛白杨(*Populus tomentosa*)、榆树(*Ulmus pumila*)和旱柳(*Salix matsudana* Koidz); 主要灌木树种有紫叶李(*Prunus cerasifera f. atropurpurea*)、黄栌(*Cotinus coggygria* Scop)、金银忍冬(*Lonicera maackii* (Rupr.) Maxim)、酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *Spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz)与连翘(*Forsythia suspensa*); 主要草本植物有紫花地丁(*Viola philippica*)、萱草(*Hemerocallis fulva*)、二月兰(*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz)、薹草(*Carex spp*)与地锦(*Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch)。

1.2 样品采集与处理

于 2020 年 10—12 月通过实地调查温榆河河岸带平原造林情况,并在北京园林绿化局官网查阅该区域平原造林实施过程,选择温榆河昌平段河岸带为样带,样带从西至东,长约 16.6 km,宽约 2 km。设置平原造林原有与重建植被类型 15 个样地,其中,原有植被类型包括乔木林 2 个、乔灌木 2 个和草地 2 个;重建植被类型包括乔木林 6 个、灌木林 3 个。样带中样地选取在空间上间隔 1 km 的距离,林分整齐且长势较好的林地作为标准样地,充分考虑不同人工林地土壤来源(如荒地、废弃矿山、建筑土壤回填等)。标准样地大小设置为 20 m×20 m,并按照“S”形用土钻钻取 5 个样点。由于城市人工林生态系统受人为扰动较大,并且北京平原地区土层薄,部分地区土层仅有 20—30 cm,因此本研究采集 0—10, 10—20, 20—30 cm 的 3 个土层的土壤样品,将采集的 225 份土壤样品挑出细根、石块等杂物后,按土层装入自封袋中,土壤样品风干后过 0.25 mm 筛后供元素测定,并采用环刀法取该样地的原状土测量容重。

1.3 土壤样品测定

于 2021 年 1—3 月在北京农学院重点实验室对土壤样品进行室内分析,土壤含水量及容重采用烘干法测定;土壤酸碱度采用电极法^[11]测定;土壤有机碳采用林业标准重铬酸钾氧化—外加热法(LY/T 1237—1999)^[12]测定;土壤全氮采用林业标准半微量凯氏定氮法(LY/T 1228—1999)^[13]测定;土壤全磷采用林业标准氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法(LY/T 1232—1999)^[14]测定。

1.4 数据统计分析

试验数据基于 SPSS 20.0 软件进行处理与分析,采用 ANOVA 单因素方差分析检验土壤 C、N、P 化

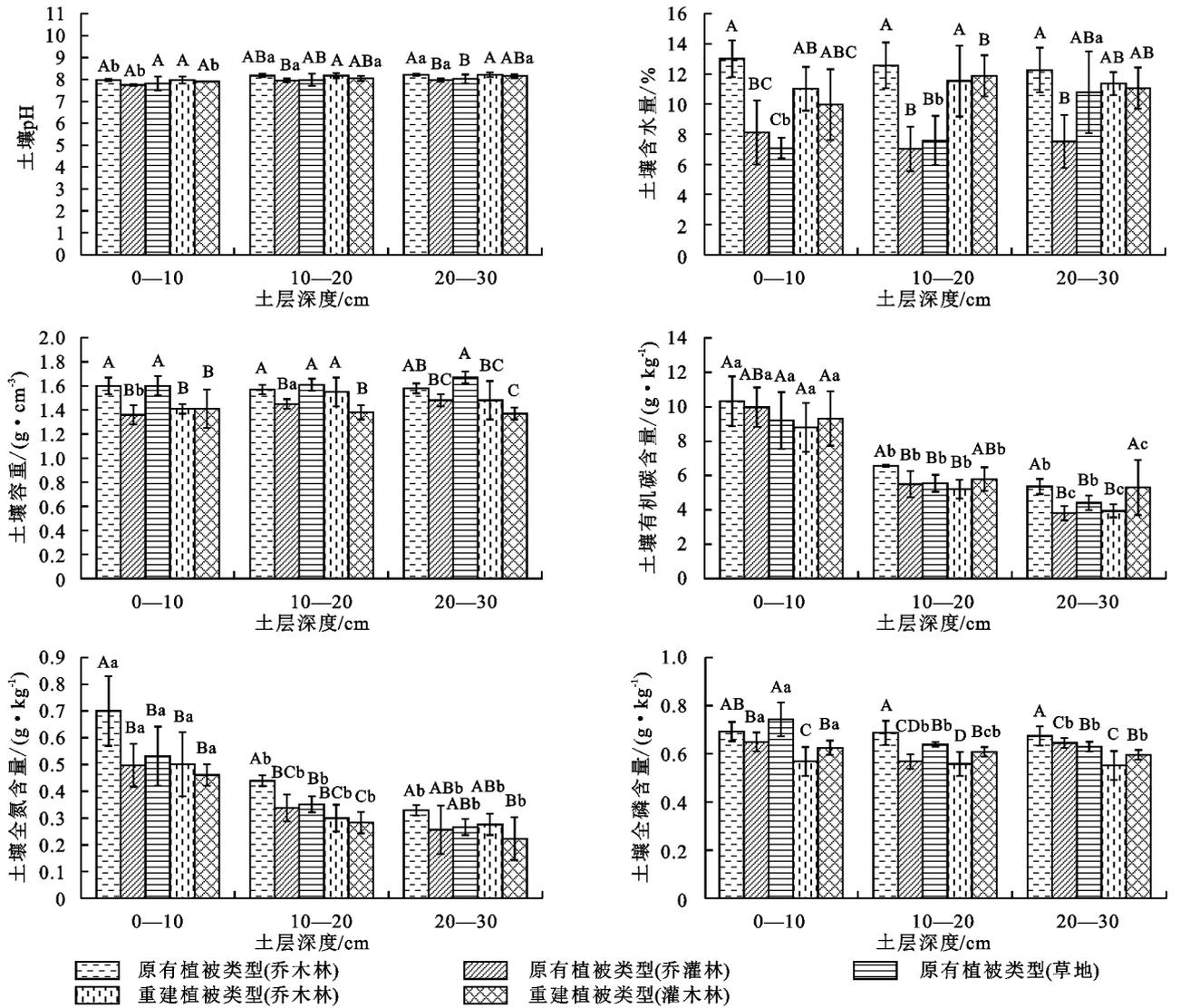
学计量的差异性,采用 LSD 法进行多重比较,利用 Pearson 相关分析法分析 C、N、P 及其计量比间特征关系;采用 Origin 2018 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 平原造林影响下原有与重建不同植被类型土壤理化特征差异

对比分析平原造林影响下,温榆河昌平段河岸带原有与重建不同植被类型土壤理化特征差异见图 1,可看出,土壤 pH 呈现为弱碱性(7.75~8.21),均随土层深度增加而增大且具有显著差异性($P < 0.05$);原有植被类型(乔木林)土壤含水量在 3 个土层间均显著高于其他植被类型,0—10 cm 土层中,以原有植被类型(草地)最低,在 10—20, 20—30 cm 土层,原有植被类型(乔灌木)显著低于其他植被类型($P < 0.05$);原有植被类型(乔木林)和重建植被类型(灌木林)土壤容重随着土层深度增加有减小的趋势,但并无显著性差异($P > 0.05$),其他植被类型样方土壤容重随土层深度增加呈现增大的趋势,以重建植被类型(乔木林)最大。

原有及重建不同植被类型土壤 SOC 和 TN 含量均在 0—10 cm 土层较高且随土层深度增加而减少,呈现一定显著性差异($P < 0.05$),其中,SOC、TN、TP 的质量分数分别为 3.810~10.320, 0.223~0.700, 0.551~0.743 g/kg;原有植被类型(乔木林)和重建植被类型(灌木林)各层土壤 SOC 均显著高于其他植被类型,原有植被类型(乔灌木、草地)和重建植被类型(乔木林)在 0—10 cm 土层的土壤 SOC 与前两者无显著差异,但在 10—20, 20—30 cm 土层中差异显著($P < 0.05$);原有植被类型(乔木林)的 TN 含量均显著高于其他植被类型,约是其他植被类型的 1.41 倍。在 10—20 cm 土层中,原有植被类型(草地)土壤 TN 含量高于原有植被类型(乔灌木)与重建植被类型(乔木林、灌木林),在 20—30 cm 土层中,重建植被类型(灌木林)的 TN 含量最低($P < 0.05$);在 0—10 cm 土层中,不同植被类型土壤 TP 表现为原有植被类型(草地>乔木林>乔灌木)>重建植被类型(灌木林>乔木林),在 10—20, 20—30 cm 的土层中,原有植被类型(乔木林、草地)土壤 TP 均显著高于其他植被类型。在 3 个土层中,均以重建植被类型(乔木林)土壤 TP 含量显著低于其他植被类型($P < 0.05$);进行多重比较结果表明,0—30 cm 土层中原有植被类型(乔木林)的土壤 SOC、TN、TP 含量略高于其他植被类型。



注:图柱上不同大写字母表示不同植被类型在同一土层间的差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示同一植被类型内不同土层间养分的差异显著($P < 0.05$)。

图 1 原有与重建不同植被类型各层土壤 C、N、P 含量差异

2.2 平原造林影响下原有与重建不同植被类型土壤生态化学计量特征

平原造林工程影响下,温榆河昌平段河岸带原有与重建不同植被类型土壤生态化学计量特征进行对比,由图 2 可知,不同植被类型样方的 C/N、N/P、C/P 均表现出一定的差异性。不同深度土层 C/N 均为重建植被类型(灌木林)高于其他植被类型,原有植被类型(乔木林)显著低于其他植被类型($P < 0.05$),前者比值介于 20.244~25.373,呈现出随土层深度增加而增加的变化趋势,后者介于 11.592~14.703,与重建植被类型(灌木林)的变化趋势相反;重建植被类型(乔木林)土壤 C/N 在 20—30 cm 土层显著低于原有植被类型(乔灌木、草地) ($P < 0.05$);不同植被类型土壤 N/P、C/P 均呈现出随土层深度增加而降低的变化趋势,原有植被类型(草地)在 0—10 cm 土层与

重建植被类型(灌木林)在 0—10, 10—20 cm 土层中的 N/P 均显著低于其他 3 种植被类型 ($P < 0.05$); C/P 在各植被类型表层土壤差异不显著 ($P > 0.05$),在 10—20, 20—30 cm 土层,原有植被类型(乔木林)的 C/P 显著低于其他植被类型,重建植被类型(乔木林)在 20—30 cm 土层显著低于重建植被类型(灌木林)、原有植被类型(乔灌木、草地) ($P < 0.05$)。

2.3 土壤 C、N、P 含量与生态化学计量比的相关性

通过对土壤 C、N、P 含量与其生态化学计量比间进行相关性分析(图 3)可知, SOC 与 TN、N/P 和 C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 C/N 呈显著正相关 ($P < 0.05$); TN 与 N/P、C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); C/N 与 C/P 呈显著性正相关 ($P < 0.05$); N/P 与 C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$),土壤 TP 与土壤 SOC、TN 和其之间的计量比无显著相关性 ($P > 0.05$)。

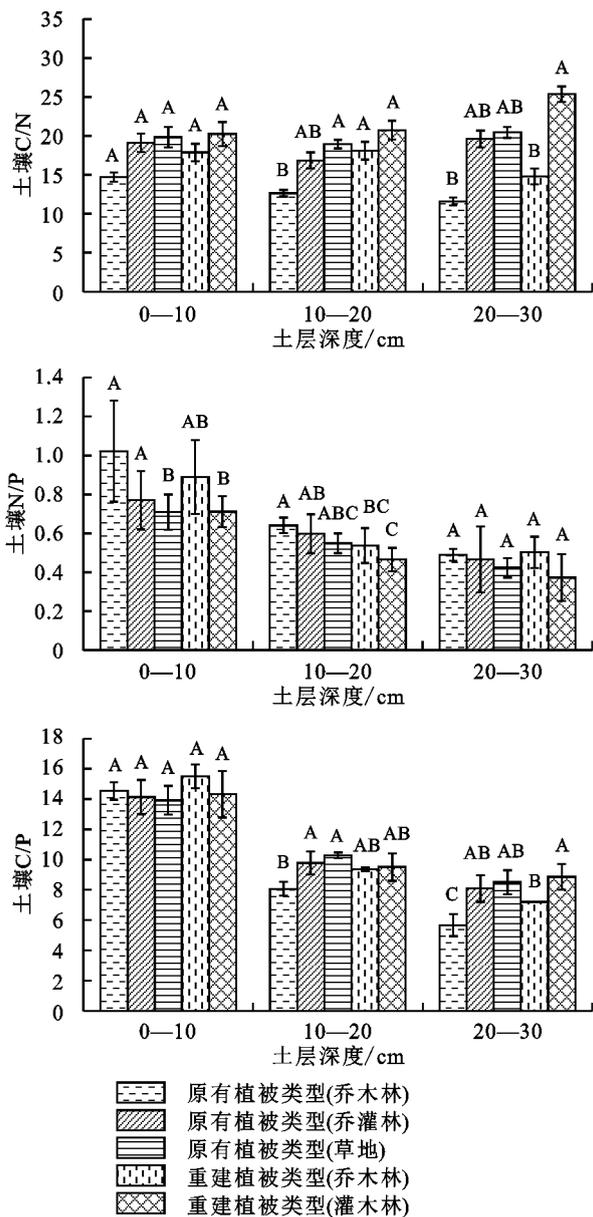
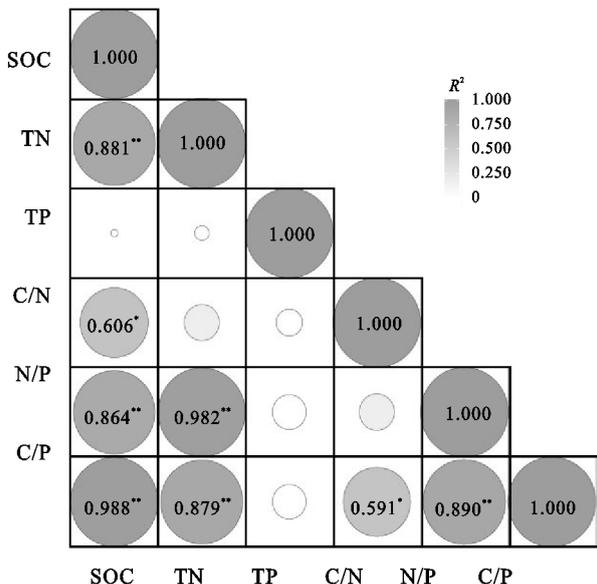


图 2 原有与重建不同植被类型的各层土壤 C/N、N/P、C/P 特征



注: 圆面积越大表示差异越显著; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

图 3 土壤 C、N、P 含量与其生态化学计量比的相关性分析

3 讨论

3.1 原有及重建植被类型中土壤碳氮磷及其生态化学计量比特征

平原造林工程的实施改变了河岸带的植被类型结构,使得河岸带土壤环境中 C、N、P 生物化学循环发生一定程度的改变^[15]。保持河岸带原有植被类型基础上,在植被不连续的点补充和栽植新的植被类型,保持植被连通性与多样性,可有效地扩大河岸植被缓冲带,进而提升土壤环境质量。原有植被类型乔木林、乔灌林土壤 SOC 含量均高于重建植被类型乔木林、灌木林,且随着土壤深度增加而减少,这一结论与何高迅等^[16]所得出的结论相同,是因植被地表凋落物与根系分泌物的累积量会随着植被补植年限增长而增多,导致碳输入量增多,使 SOC 含量增加。表层土壤不仅堆积了凋落物也是其分解为有机物质的最初界面,因此,土壤 SOC 和 TN 在表层土壤中富集,随着土层深度增加但输入量逐渐减少^[17]。土壤磷作为一种沉积性矿物元素,主要受气候、成土母质影响,在土壤中迁移率较低且移动性差,可能因为城市土壤碱性化使得土壤中活性铝离子等能够降低土壤 P 有效性的离子减少所致^[18]。原有植被类型乔木林土壤 TP 显著高于其他植被类型,随着河岸带植被恢复时间的延长,群落结构和物种丰富度也逐渐提高,对 P 素的积累提供了有利条件。重建植被类型乔木林的土壤 TP 显著低于其他植被类型,是因为该植被类型下的土壤为回填土,土壤质量及养分低于河岸带原有植被类型下土壤质量,还需通过植被长期恢复来提高土壤 TP 含量。本研究中,土壤 P 的质量分数为 0.551~0.743 g/kg,明显低于全球水平的 2.8 g/kg^[19],可见土壤 P 含量较为匮乏。

土壤 C、N、P 间的化学计量比用来衡量有机质和元素矿化能力,反映土壤内部环境养分元素循环状况,是判断生态系统结构稳定性的重要指标^[20]。C/N 可表现土壤碳氮的平衡状况,已有研究^[21]表明,C/N 与土壤有机质的分解速率成反比,比值越大,有机质分解和 N 的矿化速率越低,释放出有效 N 含量就越少,N 稳定性越高。原有植被类型乔木林土壤 C/N 在不同深度土层均显著低于其他植被类型,因为凋落物积累较多,土壤有机质养分释放也多,土壤矿化水平高导致其 C/N 低,低 C/N 预示有机质的高分解度与 N 的高稳定性。重建植被类型土壤 C/N 高,是因为植被处于栽植初期,凋落物返还比例相对较低,其土壤有机质矿化作用较慢,此时更利于有机

质积累。N、P 是植物生长过程中必需的矿物质营养元素及限制性养分,其含量高低会对植物生长发育与群落演替过程产生影响,N/P 是限制性养分判断的重要标准。N/P 基本与 TN 变化趋势一致,由于土壤 TP 变化不大,因此 N/P 的变化基本由 N 素决定,较小的 N/P 说明土壤中 N 素偏少,原有植被类型土壤 N/P 高于重建植被类型,这一现象与张富荣等^[22]得出的结果一致,土壤 N/P 随重建年限增加而增加。本研究区域内的 N/P 比值远低于全国森林土壤 N/P 的平均值 5^[23],因此,N 素是限制本研究区植物生长发育的主要营养元素,与海旭莹等^[24]得出的结论相同。C/P 可反映有机质分解时释放 P 素的多少,较低的 C/P 往往表示具有较高的 P 有效性,原有植被类型中乔木林与乔灌林土壤 C/P 低于重建植被类型,有效 P 释放能力更强,P 的有效性更高;重建植被类型土壤 C/P 较高,有机质矿化时释放 P 较少,固磷能力更强。

3.2 不同植被群落结构土壤碳氮磷及其生态化学计量特征差异

城市河流河岸带原有植被类型一般为草地,河岸带绿化建设会对草地原有土壤结构产生扰动,通过影响其水热条件及过程,从而改变其土壤养分循环与环境质量。草地土壤 TN、TP 要高于重建植被类型(乔木林与灌木林),被扰动的土壤养分需要一定时间的积累才能达到原有植被类型下的土壤环境状况,然而重建植被类型(乔木林与灌木林)土壤 SOC 要大于草地,是因为木本植被会产生大量凋落物,且多集中于土壤表层,而草本植被类型的凋落物基本来自植被死亡的根系,地上部分枯落物相对较少,所以,在浅层土壤中乔、灌木的有机质积累要高于草地。原有植被类型(乔木林与乔灌林)土壤结构与养分循环较稳定,且凋落物返还土壤比例高于草地,因此,原有植被类型的土壤环境质量要优于草地。尽管草本植物生长迅速能够在短时间内提高土壤覆盖度,有利于城市园林绿化,但草地土壤质量的改善要经历一个长期且复杂的过程,不如多层群落结构有利于土壤生态系统质量提升。

乔灌草植被根系分布深度不同,影响不同层土壤养分。乔木林下土壤 SOC、TN 和 TP 含量均高于乔灌林与灌木林,是因为乔木林群落结构较单一,乔灌林群落结构比乔木林复杂,土壤中根系也复杂,会对土壤 TN 含量产生影响,与黄磊等^[25]研究结论相同;灌木林土壤养分含量低可能与发达的根系有关,且乔

木林比灌木林返还土壤的凋落物比例更高,凋落物作为林地土壤养分的主要输入源,因而,乔木林土壤养分含量高于灌木林,周永维等^[26]研究也得出相同结论。土壤 C/N、N/P 和 C/P 在一定程度上可以反映出有机质与 P 素分解与积累情况,土壤 C/N 与土壤 SOC 分解速率、C/P 与土壤 P 有效性均呈反比关系,不同植被类型土壤 C/N 与 C/P 在土层 0—10 cm 无显著差异($P > 0.05$),但在 10—20, 20—30 cm 土壤表现为灌木林 > 乔灌林 > 乔木林,与吴旭等^[27]得出的结论一致,说明灌木林相较于乔木、乔灌林土壤 SOC 矿化及分解作用较慢、P 释放少且有效性低,乔木林受人为扰动较少,使得其土壤 SOC 和 P 的分解能力更强,P 有效性更高。本研究土壤 C/P 为 5.66~15.49,低于全国陆地土壤 C/P 比值 52.70^[28],表明本研究区整体土壤 P 有效性较高,这一结论与姜俊等^[29]研究相同。本研究土壤 N/P 比值为 0.372~1.022,表现为乔木林 > 乔灌林 > 灌木林,与陈印平等^[30]研究得出的黄河三角洲土壤 N/P(0.76)接近,但均低于我国土壤 N/P 均值 5.2,表明本研究区土壤在一定程度上处于 N 限制状态。由于灌木林的快速生长消耗了大量土壤 N 素,而各植被类型对于土壤 P 素需求较为平均,且 N/P 与 TN 呈极显著相关($P < 0.01$),因此导致灌木林在 0—10, 10—20 cm 土层 N/P 均最低,郑永林等^[9]也得到相同结论。本研究表明,平原造林能够提升土壤有机碳固存量,不同植被类型中不断积累的地表凋落物与草本更新的根系,这些作为土壤碳源的主要来源之一能够在改善土壤质量的同时,也使土壤 SOC 含量及理化性质发生明显改变。乔木林比灌木林及草地产生更多凋落物归还量,并且较低的 C/N 表明具有较多的土壤碳源,较高有机质分解与矿化速率,因此乔木林更有利于土壤 SOC 的固存与积累,赵萌捷等^[31]也得到相同结论。

4 结论

(1) 相对重建植被类型,原有植被类型受人为扰动较少,有机质释放更多,矿化水平和 P 有效性更高,土壤养分及环境质量相对较好。

(2) 河岸带各植被群落类型中,乔木林土壤 SOC 和 P 的分解能力更强;原有植被群落草地土壤积累较多 N、P 素,但草地土壤 SOC 较低;土壤固碳能力受植被群落垂直结构影响,复层植被结构土壤固碳潜力更强。

(3) 土壤质量的改善要经历一个漫长且复杂的过程,乔木林和乔灌林下的土壤能够积累较多的土壤养分,土壤质量较好,建议河岸带应以乔木为主要优势

树种, 搭种草本或乔灌混交林, 来提升城市河流河岸带土壤质量及固碳潜力。

参考文献:

- [1] 北京市园林绿化局. 抓好平原造林基础管理工作: 善始善终完成百万亩平原造林任务[C/OL]. [2015-08-12]. http://yllhj.beijing.gov.cn/zwgk/zwxx/201510/t20151008_136729.shtml.
- [2] 唐秀美, 潘瑜春, 高秉博, 等. 北京市平原造林生态系统服务价值评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 274-278.
- [3] Zhang J H, Li M X, Zhu J X, et al. C : N : P stoichiometry in terrestrial ecosystems in China. [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 795: e148849.
- [4] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 等. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望[J]. 土壤, 2016, 48(1): 29-35.
- [5] 朱潮, 武利玉, 张崇庆, 等. 兰州市北山典型侧柏人工林分叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 361-368.
- [6] 刘硕, 李品, 尚博, 等. 永定河流域典型沙区生态状况及修复建议[J]. 环境生态学, 2021, 3(8): 51-58.
- [7] 郭二辉, 樊子豪, 张瑞香, 等. 河岸带生态系统植被与土壤对水文变化的响应研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9164-9173.
- [8] 彭栋, 查同刚, 林珠. 北京市平原造林典型困难立地土壤质量评价[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 55-60.
- [9] 郑永林, 王海燕, 解雅麟, 等. 北京平原地区不同造林树种林下土壤化学计量特征[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(6): 968-973.
- [10] 李宸宇, 朱建华, 张峰, 等. 基于 NbS 的北京市乔木林固碳能力分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13-22.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 国家林业局. LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [13] 国家林业局. LY/T 1228—1999 森林土壤全氮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [14] 国家林业局. LY/T 1232—1999 森林土壤全磷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [15] 李锐锋, 杨建英, 张艳, 等. 大清河流域河岸带类型划分与植被特征[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(5): 53-58.
- [16] 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.
- [17] Ojeda J J, Caviglia O P, Agnusdei M G. Vertical distribution of root biomass and soil carbon stocks in forage cropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2018, 423(1): 175-191.
- [18] 吉鹏飞. 西安市浐灞生态区绿地土壤肥力调查与评价[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [19] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [20] 张雪, 王冬梅, 温文杰, 等. 青藏高原—黄土高原过渡带人工林土壤生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6): 81-89.
- [21] 黄郡, 马瑞福, 崔守斌, 等. 不同恢复方式下七星河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2021, 44(6): 1227-1240.
- [22] 张富荣, 柳洋, 史常明, 等. 不同恢复年限刺槐林土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 485-491.
- [23] Zhang J H, Ning Z, Liu C C, et al. C : N : P stoichiometry in China's forests: From organs to ecosystems [J]. *Functional Ecology*, 2017, 32(1): 50-60.
- [24] 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.
- [25] 黄磊, 张永娥, 邵芳丽, 等. 冀北山地天然次生林土壤生态化学计量特征及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6267-6279.
- [26] 周永维, 葛瑶, 艾宁, 等. 南泥湾湿地不同植被类型土壤养分变化规律与肥力评价[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 76-80, 87.
- [27] 吴旭, 牛耀彬, 陈云明, 等. 黄土丘陵区沙棘混交林叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 369-376.
- [28] 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(1/3): 139-151.
- [29] 姜俊, 陆元昌, 秦永胜, 等. 北京平原地区不同人工林叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 702-708.
- [30] 陈印平, 夏江宝, 赵西梅, 等. 黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 392-398.
- [31] 赵萌捷, 陈云明, 艾泽民, 等. 黄土丘陵区典型人工林有机碳分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 270-275.