

城市绿地不同林分结构特征对土壤物理性质的影响

杨洁¹, 张誉¹, 陈小平¹, 武小钢²

(1. 山西农业大学 城乡建设学院, 山西 晋中 030801; 2. 山西农业大学 林学院, 山西 晋中 030801)

摘要: 科学调整林分结构是解决城市绿地人工林土壤退化的重要途径。研究旨在为城市绿地合理经营提供理论依据。在山西省太原市森林公园中选取油松、榆树和刺槐人工纯林, 分别设置 20 m×20 m 样地并以 5 m 间距均匀采集土壤样品, 基于立木定位和每木检尺计算距土壤采样点不同半径处的林木株数、邻近木平均胸径等林分结构参数, 采用 Pearson 相关和偏最小二乘回归分析法探讨林分结构因子对土壤物理性质的影响。结果表明, 不同林分土壤物理性质存在一定差异, 榆树林下土壤容重显著低于油松林和刺槐林, 而土壤含水量、毛管持水量、毛管孔隙度、饱和持水量高于油松林和刺槐林。林分结构因子与土壤物理性质的相关系数在与立木冠幅均值大小近似的尺度上呈现最大值。通过 Pearson 相关性分析和偏最小二乘回归分析双重验证得出, 榆树林的树高与土壤饱和持水量、毛管持水量、含水量存在极高的正相关性, 相较于其他 2 个树种对改善土壤物理性质表现较优。

关键词: 林分结构特征; 土壤物理性质; Pearson 相关性; 偏最小二乘回归法; 城市绿地人工林

中图分类号: S714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)05-0114-10

Effects of Different Stand Structure Characteristics of Urban Green Space on Soil Physical Properties

YANG Jie¹, ZHANG Yu¹, CHEN Xiaoping¹, WU Xiaogang²

(1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China)

Abstract: Scientifically adjusting forest stand structure emerges as a vital approach to addressing soil degradation in plantation forests within urban green areas. In order to provide a theoretical basis for the rational operation of urban green space, in this study, artificial pure forests of *Pinus tabulaeformis*, *Ulmus pumila*, and *Robinia pseudoacacia* in the forest park of Taiyuan city, Shanxi province were selected. The 20 m×20 m sample plots were established, and soil samples were collected evenly at 5-meter intervals. The stand structure parameters including the number of trees and the average DBH(Diameter at Breast Height) of adjacent trees at various radii from the soil sampling point were calculated based on the positioning of standing trees and the inspection of each tree's base. Pearson's correlation and partial least squares regression analysis were employed to explore the effects of stand structure factors on soil physical properties. The results showed that disparities existed in soil physical properties among different stands. The soil bulk density under *Ulmus pumila* forests was significantly lower than that under *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* forests, while soil water content, capillary water holding capacity, capillary porosity, and saturated water holding capacity in the soil were higher than those under *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* forests. Correlation coefficients between stand structure factors and soil physical properties peaked at scales approximating the mean size of standing tree crowns. By double verification of the the Pearson correlation analysis and partial least squares regression analysis, *Ulmus pumila* forest height had a very high positive correlation with soil saturated water holding capacity, capillary water holding capacity, and water content, so *Ulmus pumila* forest had superior performance in improving soil physical properties compared to the other two species.

Key words: stand structure characteristics; soil physical properties; Pearson correlation; partial least squares regression method; plantation forests within urban green areas

土壤是城市绿地生态系统物质能量循环的重要环节和载体^[1], 近年来城市绿地面积快速扩张, 人工林作为城市绿地系统的重要组成部分存在很多

固有问题^[2]; 纯林连栽、树种单一化、针叶化, 林分结构单一, 导致土壤质量下降^[3], 土体结构密度变高, 透水透气性能变差, 土壤含水量降低, 蓄水持水能

收稿日期: 2024-01-16

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202103021224142)

作者简介: 杨洁(1998-), 女, 山西忻州人, 在读硕士, 研究方向: 城市园林生态。

通信作者: 武小钢(1977-), 男, 山西偏关人, 教授, 博士, 主要从事城市生态与生物多样性研究工作。

力变差^[4]。已有研究表明,植被林分结构调整对土壤质量和形成过程会产生重要影响^[5-6]。不同林分结构下其郁闭度存在差异,林下光热风条件存在差异,导致土壤质量和土壤形成过程的差异,进而导致土壤物理性质存在差异。要考虑人工造林的生态功能发挥,科学合理的林分改造有望通过微干预对人工林土壤物理性质退化问题发挥重要作用^[7]。

目前,林分与土壤物理性质相关性的研究多集中在次生林和自然林,或是研究树种^[9-10]、林分密度^[11-12]、间伐强度^[13]、林龄^[14]等对土壤的影响,或是研究大尺度林分结构特征^[14-15]与土壤质量的关系。这些研究表明,林分结构可以影响土壤质地和结构,包括土壤颗粒分布和孔隙度^[16-18]。而小尺度的研究可以更好地捕捉到生态系统内部的空间异质性,为管理和保护提供更具体的建议。目前,对城市绿地人工林林分结构与土壤物理性质相关性的研究比较匮乏,以小尺度来展开的研究基本属于空白。城市绿地与自然林、次生林研究的生态系统有很大差异,可参考性较弱。

因此,本研究选择城市典型绿地公园,测量小尺度人工纯林林分结构参数和土壤物理性质的相关性,运用偏最小二乘回归法(PLS)探讨各人工纯林林分结构对土壤物理性质的影响程度,在众多土壤物理性质影响因子中确定主导因子,进而推导影响土壤质量的主要林分结构指标,旨在为城市绿地

生态恢复和土地治理提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省太原市尖草坪区大同路太原市森林公园(37°54'N, 112°31'E),海拔790.2~793.8 m,地处北温带大陆性季风气候,全年平均气温9.5℃,1月平均气温-6.4℃,7月平均气温23℃,平均相对湿度为60%,平均日照时数为2 675.8 h,年降水量600 mm左右,无霜期平均202 d。园内树种大多为建园初期培育的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和小叶杨(*Populus simonii*),近年来新培育的有油松(*Pinus tabulaeformis*)、榆树(*Ulmus pumila*)、国槐(*Styphnolobium japonicum*)、白皮松(*Pinus bungeana*)等针阔叶树种^[19]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在森林公园中选择刺槐、油松和榆树纯林,分别设置20 m×20 m样地。3块样地均远离公园的游览景观节点,鲜少有游客涉足干扰,且养护管理水平相同。森林公园原为太原市国营林场的大沙荒工区,园区内地势平坦,土层深厚,土壤为沙质冲积河滩土,有较强的透气性和透水性,但保水、保肥能力较差^[20]。研究所选定的刺槐、油松和榆树样地内树木为同期栽植的人工纯林,林下草本植被覆盖均一。样地基本概况见表1。

表1 研究样地基本概况
Tab.1 Basic characteristics of the sampling plots

类型 Type	林分密度/ (株/hm ²) Stand density	平均树高/m Average height	平均胸径/cm Average DBH	平均冠幅/m Average crown width	平均枝下高/m Average height un- der branches	郁闭度 Canopy density	培育年限/a Incubation period
CS	725	9.13±1.95	19.03±3.94	6.31±1.31	2.62±0.70	0.77	33
CY	375	15.94±1.29	34.29±2.89	12.40±1.67	7.12±1.18	0.73	60
CH	900	11.15±3.54	18.96±7.06	7.76±3.18	4.28±1.75	0.87	60

注:CS.油松人工纯林;CY.榆树人工纯林;CH.刺槐人工纯林。

Note: CS. a pure plantation of *Pinus tabulaeformis*. CY. a pure plantation of *Ulmus pumila*. CH. a pure plantation of *Robinia pseudoacacia*.

1.2.2 样地林分结构特征调研 2022年7月,在森林公园内布设3个样地,每块样地大小为20 m×20 m,增设5 m缓冲区(图1)。使用森林罗盘仪布设调查样地,考虑到林内视野条件差,为获取准确的树木位置,采用“Interpoint Method”^[21]对样方内的林木进行逐一定位(图1-A),以调查样方的西南角顶点为坐标原点、边界为x轴和y轴,记录每一株树的坐标,并进行每木检尺。

1.2.3 土壤样品采集与测定 将样地分割为5 m×5 m样方,在样方中心设立样点(图1-B)。在样点

处用环刀采集0~20 cm土层的土样,每个样点采集3个样品,样品带回实验室在4℃条件下保存。测定容重(BD)、土壤含水量(SMO)、饱和持水量(MWHR)、毛管持水量(CWHR)、毛管孔隙度(CPS)和总孔隙度(TPS),其中,土壤容重测定采用环刀法,采用烘干法测定土壤干质量、湿质量和饱和质量,再计算其余指标。

1.3 数据处理

根据WU等^[22]林分结构参数研究方法,以3、4、5、6 m为半径,通过GIS和Python相结合,分别计

算样点不同半径内的林木株数(N)、邻近木平均胸径(MDBH)、平均树高(MH)、平均枝下高(Mh)、郁闭度(C)、胸径最大值(DBHmax)、邻近木平均距离(MSD)、最近邻近木胸径(nearDBH)和最近邻近木距离(nearDIST)(图1)。不同树种土壤物理性质的差异比较采用单因素方差分析、邓肯多重比较。采用Pearson相关分析林分结构参数对土壤物理性质的影响。一些林分结构参数之间具有强自相关,在回归分析中作为自变量建立线性回归模型时存在多重共线性,采用偏最小二乘回归法(PLS)研究林分结构对各土壤物理性质的影响程度。在PLS分

析过程中,通过交叉有效性和投影重要性指数确定提取主成分数量,在3种人工纯林的分析中,主成分数量均为1。分别在X(自变量,林分结构)、Y(因变量,土壤物理性质)提取主成分U1和V1,要求U1和V1尽可能大地携带各自数据中的变异信息,且二者的相关性达最大。然后建立主成分与Y的关系表达式,计算描述主成分与各自的研究项之间的相关系数载荷值,进行主成分与研究项之间的精度分析,最后建立林分结构对土壤物理性质的方程模型。采用Excel 2019和Origin 2022软件制作图表。

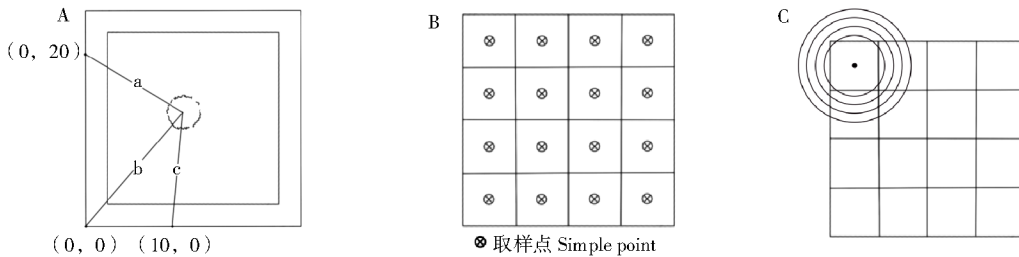


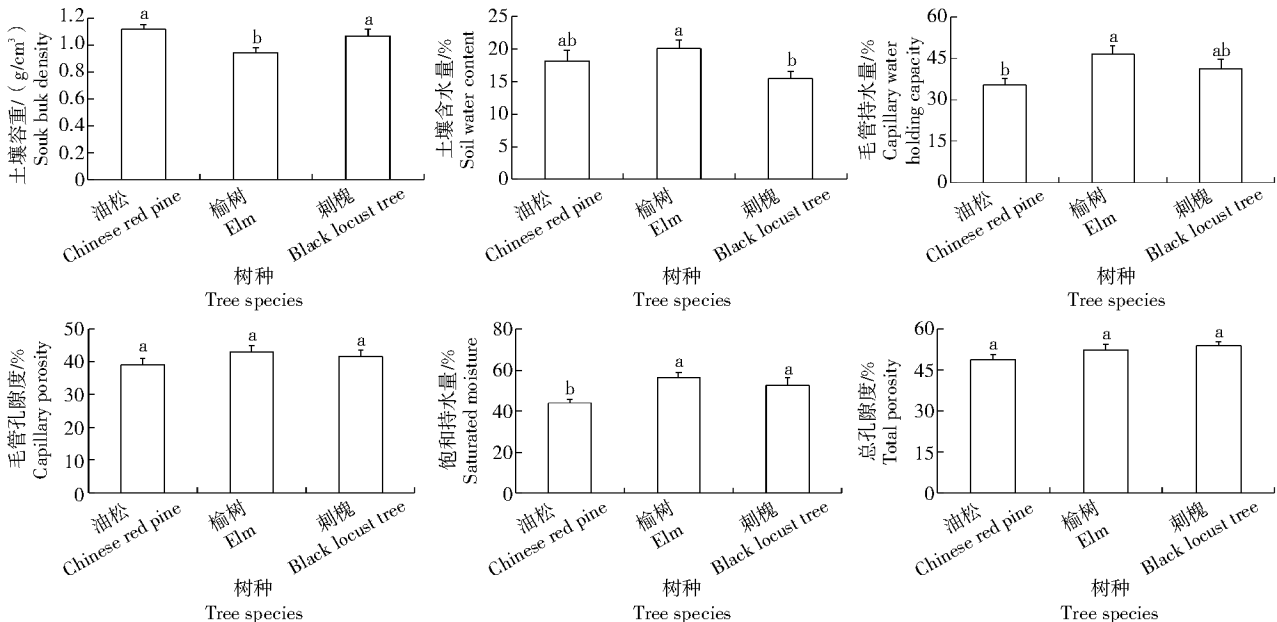
图1 林分结构特征测量方法(A),土壤取样点示意(B)和林分结构参数构建半径示意(C)
Fig.1 Methods for measuring stand structural characteristics (A), diagram of soil sampling site (B) and schematic diagram of construction radius of stand structure parameters (C)

2 结果与分析

2.1 不同林分土壤物理性质特征

从图2可以看出,3种林分中油松林土壤容重最大(1.12 g/cm³),榆树林最小(0.95 g/cm³),油松林和刺槐林的土壤容重显著高于榆树林($P < 0.05$);

榆树林土壤含水量(20.1%)显著高于刺槐林(15.4%),而油松林与二者无显著差异;榆树林土壤毛管持水量(46.5%)显著高于油松林(35.3%) ($P < 0.05$),刺槐林与二者无显著差异。榆树林和刺槐林饱和持水量显著高于油松林($P < 0.05$)。3种林分土壤总孔隙度和毛管孔隙度无显著差异。



不同小写字母代表各林型间在0.05水平上差异显著
Different small letters indicated significant difference at 0.05 level among the three forestst

图2 不同纯林树种土壤物理性质特征
Fig.2 Soil physical properties of different pure forest species

2.2 油松林各样点土壤物理性质和林分结构指标的相关性分析

油松林林分结构特征指标与土壤的物理性质大多为负相关(图3),其中油松林相关性最强为测量半径4 m时土壤容重和平均胸径的相关性,呈极显著负相关(相关性系数为-0.611, $P < 0.01$)。此外,测量半径为5、6 m时,土壤容重与平均胸径同样存在显著负相关,且测量半径为3、4、5 m时,容重与胸径最大值、郁闭度呈显著负相关($P < 0.05$)。综上,在油松林中,与林分结构相关性最强的土壤

物理性质为土壤容重。在测量半径3、4、5 m时,平均树高和土壤含水量呈显著负相关;测量半径为3 m时,平均树高和总孔隙度呈显著负相关;半径5 m的平均树高与毛管孔隙度呈显著负相关($P < 0.05$)。其中,测量半径为6 m的邻近木平均距离与毛管孔隙度呈显著负相关($P < 0.05$),半径为3、5 m时邻近木数量与毛管孔隙度呈显著正相关($P < 0.05$)。综上所述,林分结构按相关系数达到显著的数量依次为平均胸径 > 平均树高 > 胸径最大值 > 郁闭度 > 邻近木数量 > 邻近木平均距离。

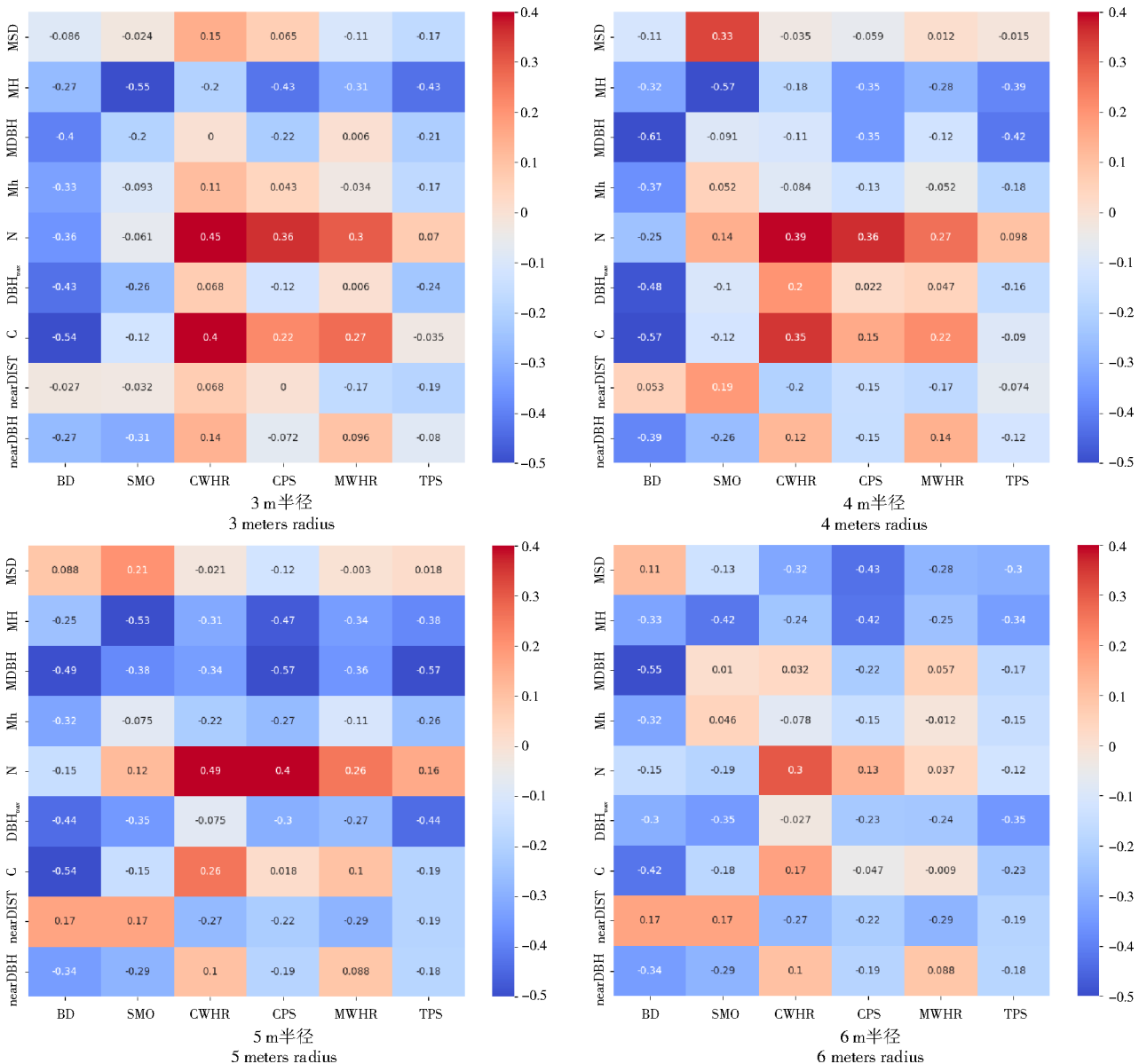


图3 油松林土壤物理性质和林分结构指标的相关系数
Fig.3 Correlation coefficient between soil physical property and stand structure index of *Pinus tabulaeformis* forest

从回归分析中看,油松人工纯林中各半径下林分结构对各土壤物理性质的影响有明显规律(图4)。在3 m半径中,除容重、土壤含水量和总孔隙度外,

其他土壤物理性质均受林分结构正向影响。而在5、6 m半径中,土壤物理性质几乎均受林分结构负向影响。其中,5 m半径范围内,邻近木数量对各土

壤物理性质呈正向影响;6 m 半径范围内,平均树高对各土壤物理性质存在微小的正向影响。不同的林分结构对土壤性质的影响程度也不同。在 5 m 半径下,容重受平均树高和平均胸径显著的负向影响(回归标准系数分别为 -0.147 、 -0.135 , $P < 0.05$),影响程度均高于其他林分结构指标;总孔隙度受平均树高、平均胸径和胸径最大值的显著负向影响(回归标准系数分别为 -0.221 、 -0.204 、 -0.165 , $P < 0.05$),其中,平均树高达到了极负向显著影响($P <$

0.01)。在 PLS 分析中,部分正负效应与相关性分析完全耦合,比如,在 5 m 半径中,总孔隙度受各林分结构正负影响效应与相关性分析结果完全耦合。但也出现其他现象,如同样在 5 m 半径下,树木数量对容重为正向影响,而在相关性分析中,却显示树木数量与容重呈负相关关系,这是因为树木数量作为自变量可能与其他自变量存在多重共线性,所以,导致 PLS 分析中,结果与相关性分析不一致,这也突出了 PLS 分析的重要性。

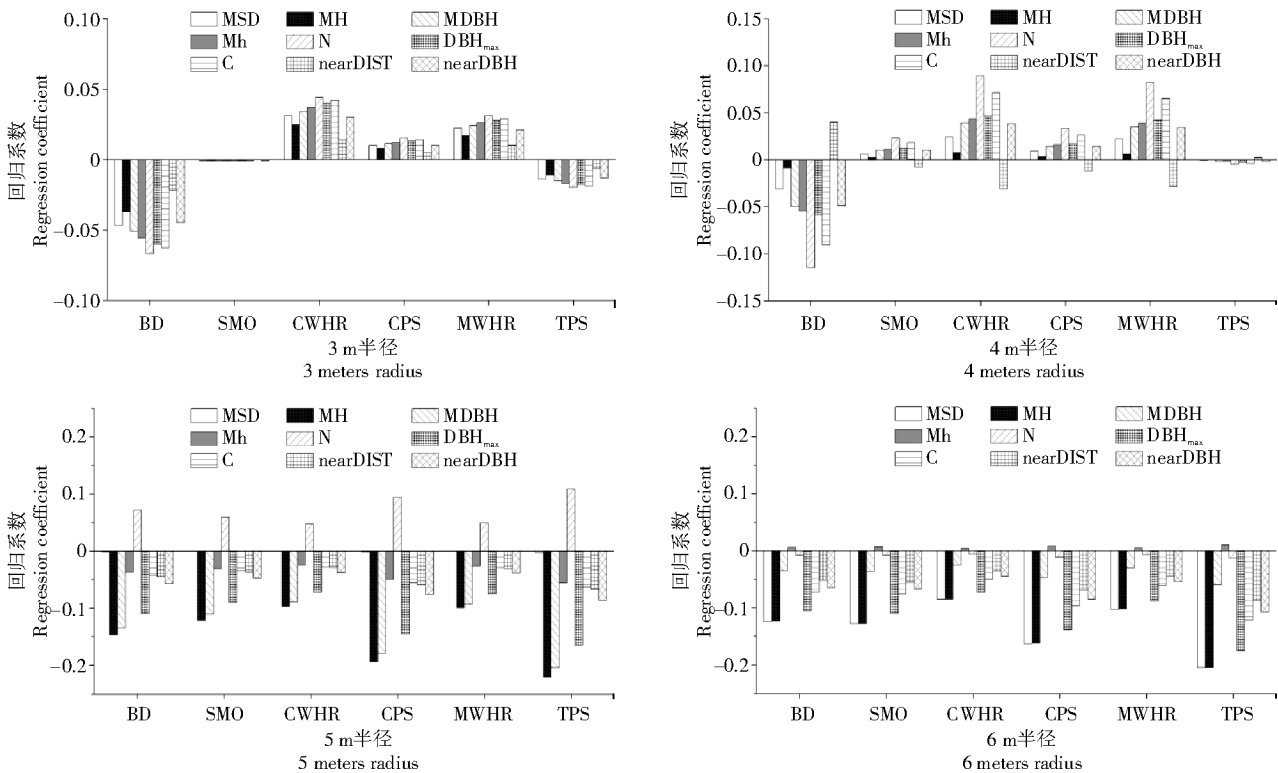


图 4 油松林土壤物理性质和林分结构指标的回归分析
Fig.4 Regression analysis of soil physical property and stand structure index of *Pinus tabulaeformis* forest

2.3 榆树林各样点土壤物理性质和林分结构指标的相关性和 PLS 分析

榆树林中林分结构特征指标与土壤物理性质的相关性系数达到显著水平($P < 0.05$),大多为正相关(图 5)。其中,测量半径 5、6 m 的树高与毛管持水量、饱和持水量呈显著正相关,半径 5 m 的相关性较高(相关系数为 0.653 、 0.713 , $P < 0.01$);测量半径 4、5、6 m 的树高与含水量呈显著正相关,半径 5 m 时相关性较高(相关性系数为 0.651 , $P < 0.01$);半径 5 m 的树高和毛管孔隙度、总孔隙度呈显著正相关。综上,榆树林中平均树高与土壤物理性质的相关性最强。半径 3、5、6 m 的平均胸径与含水量呈显著正相关;半径 3、5 m 时平均胸径与毛管持水量、饱和持水量呈显著正相关。半径 3、5、6 m

的胸径最大值与含水量呈显著正相关,半径 3、5 m 时胸径最大值与毛管持水量、饱和持水量呈显著正相关,半径 5、6 m 时胸径最大值与毛管孔隙度、总孔隙度呈显著正相关。半径 3、5、6 m 的最近邻近木胸径与含水量呈显著正相关,半径 5 m 时与毛管持水量、饱和持水量呈显著正相关,半径 6 m 时与总孔隙度呈显著正相关。半径 3 m 时郁闭度与饱和持水量呈显著正相关;半径 3 m 时最近邻近木距离与毛管持水量呈显著负相关。综上可得,林分结构参数相关系数大小依次为平均树高>平均胸径>胸径最大值>最近邻近木胸径>邻近木数量>郁闭度>最近邻近木距离。

同时在榆树人工纯林的样地中,相关性分析结果和 PLS 分析得到林分结构指标对土壤物理性质

的影响结果类似,如在6 m半径下,平均树高、平均胸径、胸径最大值以及最近邻近木胸径与土壤含水量呈显著相关,这样的结果在PLS分析中也得到印证,4个指标在回归方程中系数值最大,且均为显著

的正向影响。说明在榆树林PLS分析中对于林分结构对土壤物理性质影响回归方程的构建合理,且很大程度与相关性分析部分结论耦合。

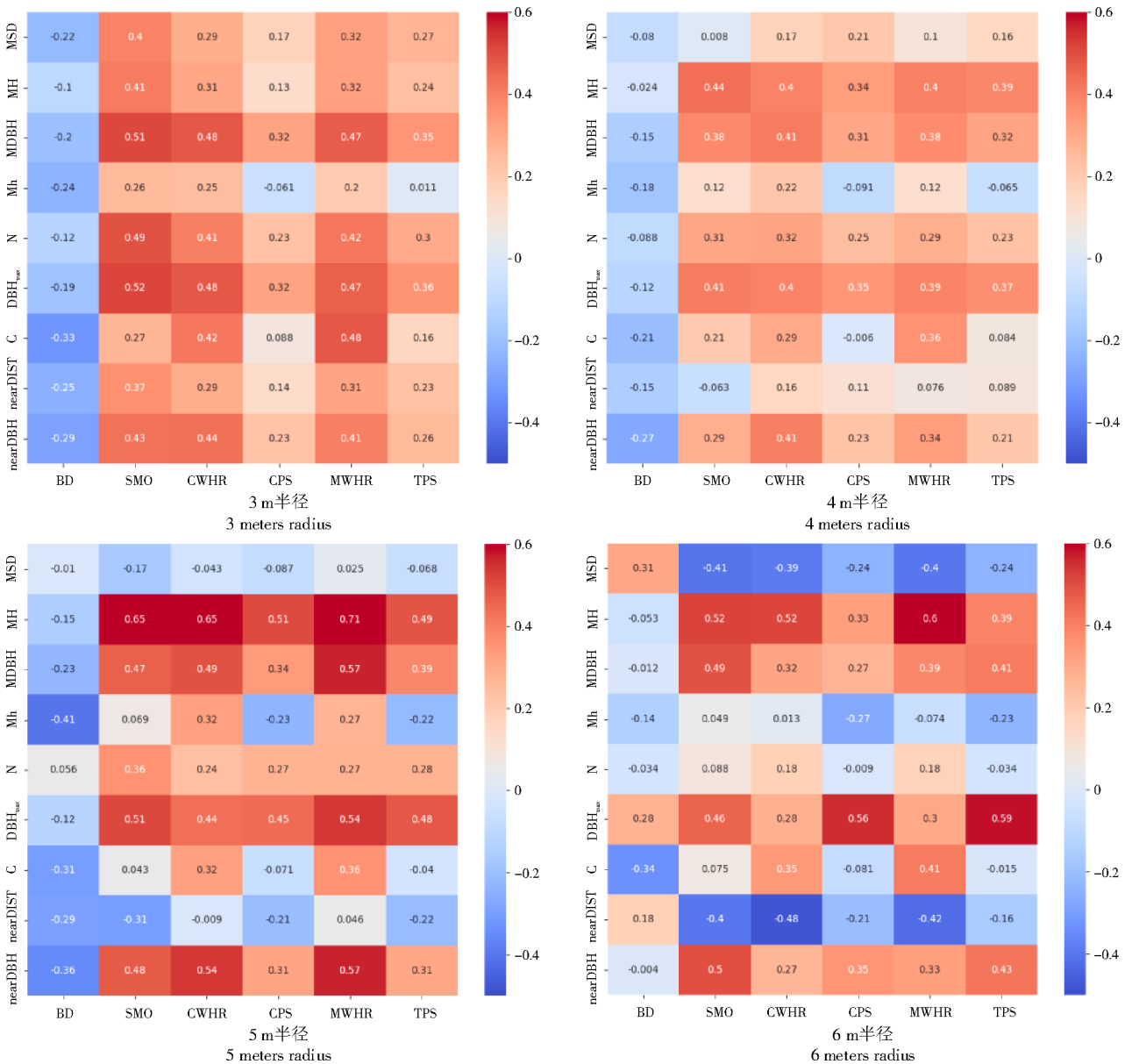


图5 榆树林土壤物理性质和林分结构指标的相关系数
Fig.5 Correlation coefficient between soil physical property and stand structure index of elm forest

从不同半径上看,3、4、5 m不同结构指标对同一土壤物理性质的正负影响均趋于一致(图6)。3 m和4 m半径下,除容重外,其他物理性质均受林分结构的正向影响,在5 m半径范围内,最近邻近木距离与其他林分结构指标呈现相反规律。而在同一半径下,不同林分结构指标对同一物理性质的影响程度存在差异。以6 m半径为例,受林分结构影响最为明显的土壤物理性质是土壤含水量,其受

到平均胸径、平均树高、胸径最大值以及最近邻近木胸径的显著正向影响(回归系数分别为0.185、0.200、0.207、0.155, $P < 0.05$),其中平均胸径的影响为极显著影响($P < 0.01$),而在毛管孔隙度和总孔隙度2个物理性质中,平均胸径和最近邻近木胸径仍然是影响程度最大的2个林分结构指标,且均为正向影响。

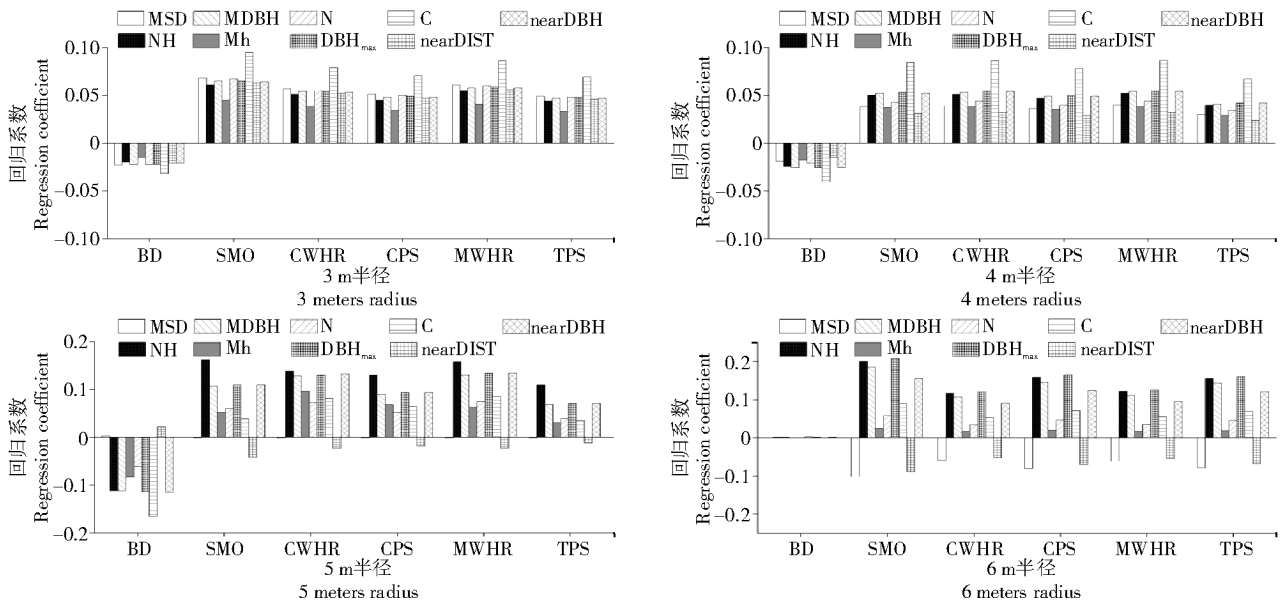


图6 榆树林土壤物理性质和林分结构指标的回归分析
Fig.6 Regression analysis of soil physical property and stand structure index of *Ulmus pumila* forest

2.4 刺槐林各样点土壤物理性质和林分结构指标的相关性和PLS分析

相关系数达到显著水平 ($P < 0.05$), 大多为正相关(图7)。

刺槐林林分结构特征指标与土壤物理性质的

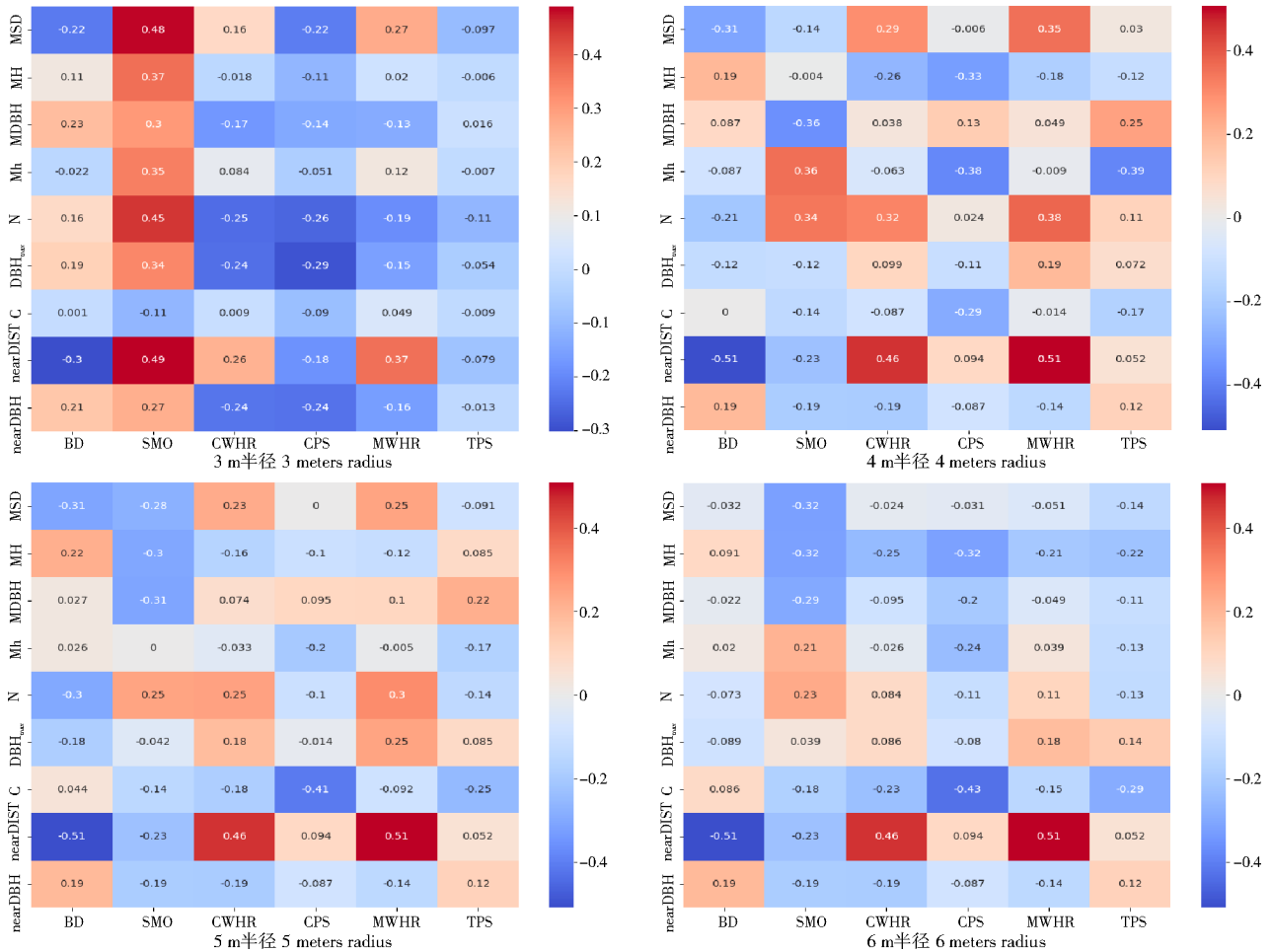


图7 刺槐林土壤物理性质和林分结构指标的相关系数
Fig.7 Correlation coefficient between soil physical property and stand structure index of robinia locust forest

其中,测量半径为3 m的邻近木平均距离与含水量呈显著正相关;测量半径3 m时邻近木数量与含水量呈显著正相关;半径6 m的郁闭度和毛管孔隙度呈显著正相关;半径3 m时最近邻近木胸径与含水量呈显著正相关;半径4、5、6 m的最近邻近木胸径与容重、毛管持水量、饱和持水量呈显著正相关($P < 0.05$)。数据显示,在刺槐林土壤物理性质与林分结构特征各指标相关性较弱。

刺槐林在不同半径上林分结构指标对土壤物

理性质的影响存在一定规律,但较其他2类人工纯林影响并不明显,土壤物理性质受不同林分结构指标的影响均未达到显著水平(图8)。值得一提的是,该树种下每个半径的结果中,容重受最近邻近木距离的负向影响,而其他物理性质均受其正向影响,特别是在6 m半径下,表现最为明显,这一点在相关性分析中也得到了印证:当半径为6 m时,最近邻近木距离与容重呈显著负相关关系,与毛管持水量和饱和持水量呈显著正相关关系。

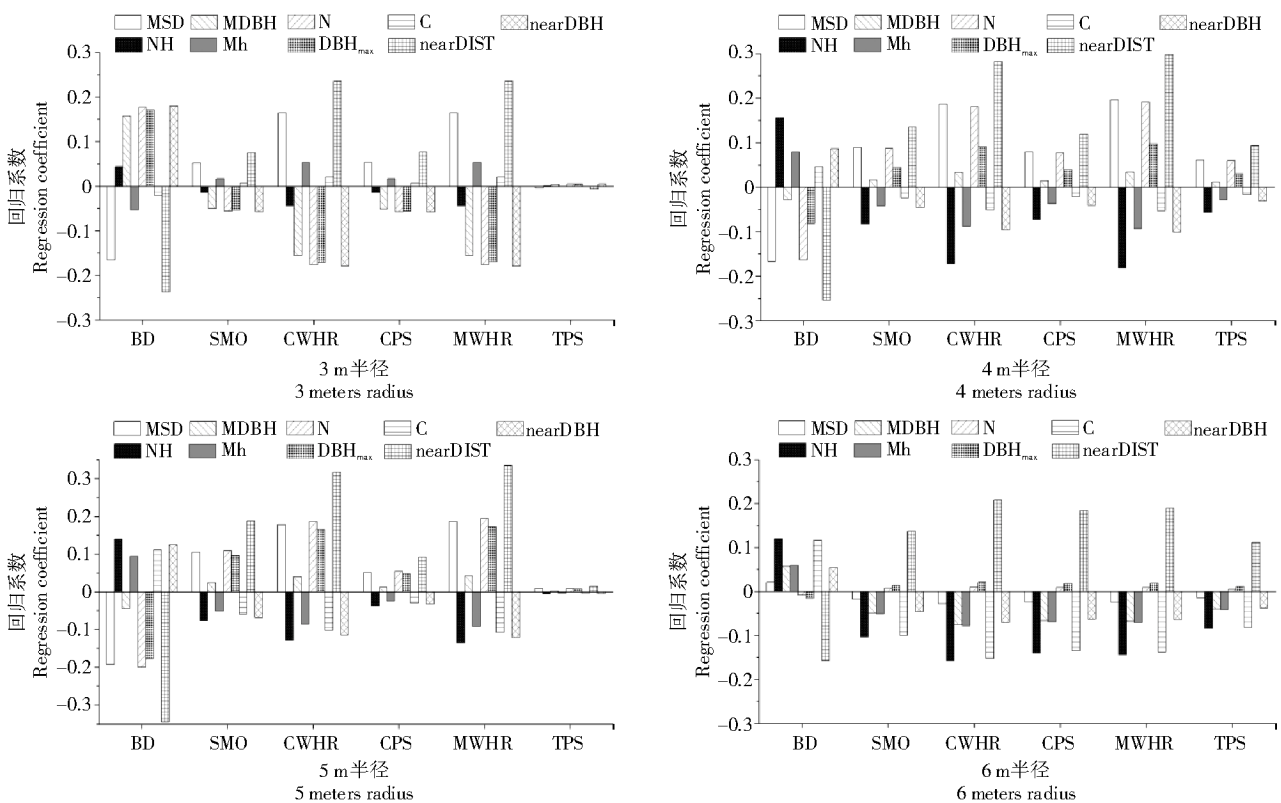


图8 刺槐林土壤物理性质和林分结构指标的标准回归分析
Fig.8 Regression analysis of soil physical property and stand structure index of *Robinia pseudoacacia* forest

3 结论与讨论

生态系统内部存在许多微观变化,这些变化在小尺度上显著,但在较大尺度上会平均掉或模糊不清。冯强等^[23]研究表明,土壤性质在大尺度上受到气候、母质、时间等宏观因素的影响,而在小尺度上可能受到林分结构、土地利用、地形等微观因素的影响,这与本研究结果相符。本研究表明,不同尺度上林分结构特征与土壤物理性质的相关性具有明显差异。榆树样地林木平均冠幅为12.4 m,而测量半径为5 m时与林分结构因子相关性达到显著水平的土壤物理性质参数最多,为16个;刺槐样地平均冠幅为7.76 m,在测量半径3 m时相关系数达

到显著水平的土壤物理性质参数最多;油松林样地平均冠幅为6.31 m,相关系数达到显著水平的土壤物理性质参数在半径4 m处最多,在6 m半径处相关性最弱。林分结构因子与土壤物理性质的关系表现出明显的尺度依赖性。小尺度研究能够更准确地识别局部结构差异对系统的影响。

本研究回归方程模型显示,邻近木平均树高、平均胸径以及胸径最大值等作为影响土壤物理性质的主导因子,影响效应不同,其中树高的显著性最高。树高作为林分竖向空间结构特征,反映了树木在垂直方向的位置和生长状态。李云鹏^[24]研究表明,树冠的庇阴效应会影响土壤的结构,从而改善土壤持水特征和孔隙度。赵文玥等^[25]研究表明,

树木越高树冠拦截降水位置越高,减少降水对土壤的冲刷效应,使其以更缓慢的速度渗透到土壤中,减少土壤侵蚀和水分流失;同时树冠的庇阴效应也会影响土壤的水分蒸发和保持。因此,在二者的综合影响下导致平均树高与土壤容重、土壤含水量、总孔隙度之间有着很强的相关性。以上研究与本研究结果相符,但树高与土壤物理性质关系研究成果极少,是否因树冠效应导致这一结果还有待进一步验证。

赵晓雪等^[26]研究表明,树冠可以减少土壤表面的直接暴露,降低水分的蒸发速率,有利于土壤中水分的保持,因此,高林分密度会导致土壤含水量、毛管持水量、饱和持水量显著提升,这与本研究结果吻合。在刺槐林 6 m 测量半径下,最近邻近木距离对土壤容重的影响表现为显著负相关,对毛管持水量和饱和持水量的影响则表现为显著正相关。在测量范围为 3 m 时,榆树林、刺槐林的邻近木数量与土壤含水量显著正相关,邻近木的数量增加,林分密度变高,土壤含水量也增加,这与 ZHANG 等^[16]在大尺度上对林分密度和土壤性质相关性的研究结果吻合。

本研究中,林分结构对土壤物理性质的影响仅限于对二者关系的探讨,未涉及林分结构对根系压实、凋落物输入、有机质形成和分解过程的影响,在今后研究中应该将理解和量化植被根系对土壤结构和土壤水力特性的影响作为一个重点方向,并与土壤团聚体形成和稳定相结合,为城市绿地土壤质量演变和土壤质量的可持续提供理论支撑。

本研究表明,不同林分土壤物理性质存在差异,榆树林下土壤容重显著低于油松林和刺槐林,而土壤含水量、毛管持水量、毛管孔隙度、土壤饱和持水量高于油松林和刺槐林。树高、胸径均值和胸径最大值对土壤物理性质具有显著影响,在榆树林分中表现为正向影响,而在油松林分中表现为负向影响。榆树林的郁闭度、平均枝下高对土壤毛管持水量和饱和持水量存在极显著影响。刺槐林最近邻近木距离与容重呈显著负相关,其他林分结构因子与土壤物理性质相关性不显著。林分结构因子与土壤物理性质的相关系数在与立木冠幅均值大小近似的尺度上呈现最大值。

参考文献:

[1] 张桥,蔡婵凤. 森林土壤退化及其防治研究综述[J]. 生态环境, 2004,13(4):677-680.

- ZHANG Q, CAI C F. Review on forest soil degradation and its prevention and control[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2004,13(4):677-680.
- [2] 侯淑艳. 北京市低山区低效人工林结构特征与评价研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- HOU S Y. Study on the assessment and structure feature of low function plantation in the low mountain of Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [3] 金正道. 我国人工林经营现状与集约经营对策[J]. 中国生态农业学报, 2003,11(1):133-134.
- JIN Z D. Present managing situations and intensive management of man-made forest in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003,11(1):133-134.
- [4] LORENZ K, KANDELER E. Microbial biomass activities in urban soils in two consecutive years[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006,169(6):799-808.
- [5] LI J W, DU J, ZHONG S Q, et al. Changes in the profile properties and chemical weathering characteristics of cultivated soils affected by anthropic activities[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 20822.
- [6] 张岩,张瑞香,刘占欣,等. 黄河河岸带不同人为干扰的土壤物理性质比较[J]. 浙江农林大学学报, 2023,40(5):1035-1044.
- ZHANG Y, ZHANG R X, LIU Z X, et al. Comparison of soil physical properties under different human disturbances in the Yellow River riparian zone[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2023,40(5):1035-1044.
- [7] 惠刚盈,胡艳波,赵中华. 结构化森林经营研究进展[J]. 林业科学研究, 2018,31(1):85-93.
- HUI G Y, HU Y B, ZHAO Z H. Research progress of structure-based forest management[J]. Forest Research, 2018, 31 (1) : 85-93.
- [8] 邓仕坚,张家武,陈楚莹,等. 不同树种混交林及其纯林对土壤理化性质影响的研究[J]. 应用生态学报, 1994,5(2):126-132.
- DENG S J, ZHANG J W, CHEN C Y, et al. Effect of pure and mixed stands on soil physical and chemical properties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994,5(2):126-132.
- [9] AYRES E, STELTZER H, BERG S, et al. Tree species traits influence soil physical, chemical, and biological properties in high elevation forests[J]. PLoS One, 2009,4(6):e5964.
- [10] LIU T R, PENG D L, TAN Z J, et al. Do stand density and month regulate soil enzymes and the stoichiometry of differently aged *Larix principis-rupprechtii* plantations? [J]. CATENA, 2023,220:106683.
- [11] 汪星星,廖文海,左晓东,等. 密度调控对杉木人工林土壤理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023,51(1):82-87.
- WANG X X, LIAO W H, ZUO X D, et al. Effect of soil physicochemical properties of fir plantation under density regulation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51 (1) : 82-87.
- [12] 黄木易,梁燕芳,苏福聪,等. 桉树不同间伐强度下套种乡土树种对林分生长和土壤理化性质的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021,41(6):81-90.
- HUANG M Y, LIANG Y F, SU F C, et al. Effects of interplanting native tree species on stand growth and soil physical and chemical properties under different thinning intensities of

- Eucalyptus*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(6): 81-90.
- [13] ZHU W, ZHOU O, SUN Y M, et al. Effects of stand age and structure on root distribution and root water uptake in fast-growing poplar plantations[J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128831.
- [14] WEN Y X, TONG R, ZHANG H, et al. N addition decreased stand structure diversity in young but increased in middle-aged *Metasequoia glyptostroboides* plantations[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 30: e01803.
- [15] 赵如楠. 平原农区不同结构苦楝人工林林分生长及土壤理化性质研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
ZHAO R N. Study on stand growth and soil physicochemical properties of different structures of *melia azedarach* l plantation in plain agricultural area[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.
- [16] ZHANG Y X, LIU T R, GUO J P, et al. Changes in the understorey diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01628.
- [17] BONČINA A, KLOPČIČ M, TRIFKOVIĆ V, et al. Tree and stand growth differ among soil classes in semi-natural forests in central Europe[J]. CATENA, 2023, 222: 106854.
- [18] 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.
- [19] 成方斌. 太原市森林公园绿化树种的调查分析[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(20): 74-75, 143.
CHENG F B. Investigation and analysis of greening tree species in Taiyuan forest park[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(20): 74-75, 143.
- [20] 赵慧茹. 关于太原市森林公园绿化树种的选择探析[J]. 花卉, 2018(14): 191-192.
- ZHAO H R. An analysis on the selection of tree species for forest park greening in Taiyuan city[J]. Flowers, 2018 (14): 191-192.
- [21] BOOSE E R, BOOSE E F, LEZBERG A L. A practical method for mapping trees using distance measurements[J]. Ecology, 1998, 79(3): 819.
- [22] WU X G, YUAN J J, MA S L, et al. Seasonal spatial pattern of soil respiration in a temperate urban forest in Beijing[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(4): 1122-1130.
- [23] 冯强, 段宝玲, 姜硕. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(1): 39-45.
FENG Q, DUAN B L, JIANG S. Spatial heterogeneity of bulk density and its influencing factors at small watershed scale [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 36(1): 39-45.
- [24] 李云鹏. 北京典型植物根系固土机理及含植被坡体稳定分析研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
LI Y P. Research on root reinforcement mechanisms and evaluation of vegetation slope stability in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [25] 赵文玥, 吉喜斌. 干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2021, 36(8): 862-879.
ZHAO W Y, JI X B. A review of research advances and future perspectives of evaporation of intercepted rainfall from sparse tree canopy in drylands[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(8): 862-879.
- [26] 赵晓雪, 饶良懿, 申震洲. 砒砂岩区不同地形位置土壤物理性质分异特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1359-1368.
ZHAO X X, RAO L Y, SHEN Z Z. Heterogeneous characteristics of soil physical properties of different terrain locations in the Pisha sandstone area[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6): 1359-1368.