

上海典型城市林地土壤肥力特征分析与评价^①

林勇^{1,2,3}, 于全波^{1,2,3}, 仲启铖^{1,2,3*}

(1 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 2 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232; 3 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 上海 200232)

摘要: 城市林地土壤肥力影响森林质量提升。为掌握超大城市林地土壤肥力状况, 本研究以上海为例, 基于分层抽样法布设 632 个样点, 于 2023—2024 年采集 0~20 cm 土壤样品, 分别测定了质地、容重等 11 个土壤肥力指标。并基于第二次全国土壤普查土壤养分分级等相关标准、内梅罗综合指数法、Pearson 相关性分析和逐步线性回归法, 评价了上海林地土壤肥力特征, 分析了 9 个涉林行政区(崇明、浦东、闵行、奉贤、金山、松江、青浦、嘉定和宝山)和 5 种林种(水源涵养林、防护林、环境保护林、开放休闲林和其余林)对土壤肥力的影响, 探究了土壤指标对土壤肥力的影响及其相关性。结果表明: ①上海城市林地土壤质地以粉砂壤土或粉砂质黏壤土为主, 容重偏高、非毛管孔隙度较低, 平均值分别为 1.43 g/kg 和 1.05%; 土壤 pH 为 4.97~9.07, 整体上偏碱性; 电导率适中, 阳离子交换量中等, 为 3.19~22.6 cmol/kg; 全氮含量为中等, 有效磷、速效钾含量为中等偏下, 有机质、碱解氮含量为缺乏。②改进的内梅罗综合指数法评价结果显示, 上海城市林地土壤肥力综合指数为 1.15, 土壤肥力中等偏低; 林种对上海城市林地土壤肥力无显著性影响, 但行政区划对林地土壤肥力影响显著。③除黏粒含量和电导率外, 上海城市林地土壤肥力指标与肥力综合指数显著相关, 全氮和有机质与其相关系数相对较高, 分别为 0.763 和 0.733; 逐步线性回归结果表明, 有机质、阳离子交换量和全氮的标准化系数最高, 分别为 0.300、0.263、0.256。综上, 上海城市林地土壤肥力中等偏低, 受行政区划影响, 有机质是关键障碍因子。

关键词: 行政区划; 城市林地; 土壤肥力; 有机质; 障碍因子

中图分类号: S158 文献标志码: A

Analysis and Evaluation of Soil Fertility Characteristics of Typical Urban Forest Land of Shanghai

LIN Yong^{1,2,3}, YU Quanbo^{1,2,3}, ZHONG Qicheng^{1,2,3*}

(1 Shanghai Academy of Landscape Architecture and Planning, Shanghai 200232, China; 2 Shanghai Engineering Research Center for Greening Technology of Challenging Urban Sites, Shanghai 200232, China; 3 Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai 200232, China)

Abstract: The fertility of urban forest soils significantly influences forest quality enhancement. To assess soil fertility status of urban forest land in megacities, this study selected Shanghai as a case. Utilizing a stratified sampling approach, 632 topsoil (0–20 cm depth) samples were collected from 2023 to 2024. Eleven soil fertility indicators were analyzed, including texture (ST), bulk density (BD), and others. And relevant standards from the Second National Soil Survey (such as soil nutrient grading), the modified Nemerow index method, Pearson correlation analysis, and stepwise linear regression analysis were used to evaluate the fertility characteristics, analyze the impacts of administrative districts (Chongming, Pudong, Minhang, Fengxian, Jinshan, Songjiang, Qingpu, Jiading, Baoshan) and forest types (water conservation forest, protective forest, environmental protection forest, open recreational forest, other forests) on soil fertility, and investigate the correlations between soil indicators and fertility, along with their relative influences. The results showed that: 1) ST of urban forest land of Shanghai was predominantly silty loam or silty clay loam. BD was relatively high, and non-capillary porosity was low, with average values of 1.43 g/cm³ and 1.05%, respectively. Soil pH ranged from 4.97 to 9.07, being overall alkaline. Electrical

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802601)和上海市财政专项(上海市林地土壤质量监测体系)资助。

* 通信作者(zhongqc2015@hotmail.com)

作者简介: 林勇(1976—), 男, 上海人, 硕士, 高级工程师, 主要从事城市生态监测与信息化研究。E-mail: 4950516@qq.com

conductivity (EC) was at moderate level, and cation exchange capacity (CEC) was at moderate level, in the range of 3.19–22.6 cmol/kg. Total nitrogen content (TN) was at moderate level, while available phosphorus (AP) and available potassium (AK) contents were at moderate to lower levels, and soil organic matter (SOM) and alkali-hydrolyzable nitrogen (AN) were at deficient level, available phosphorus (AP). 2) Comprehensive evaluation using the modified Nemerow index method indicated that the overall soil fertility of urban forest land of Shanghai was at ‘moderate’ level but partly lower (comprehensive fertility index was 1.15). Forest type had no significant impact on soil fertility, but administrative district significantly affected forest soil fertility. 3) Except for clay content and EC, comprehensive fertility index of urban forest land was significantly correlated with other soil indicators, the correlation coefficients with TN and SOM were relatively high, which were 0.763 and 0.733, respectively. The results of stepwise linear regression analysis showed that SOM, CEC, and TN had the highest standardized coefficients, which were 0.300, 0.263, and 0.256, respectively. In conclusion, soil fertility of urban forest land of Shanghai was moderate but partly lower and influenced by administrative district, and SOM was the key soil constraint factor for improving soil fertility.

Key words: Administrative divisions; Urban forest land; Soil fertility; Organic matter; Soil constraint factor

城市林地主要分布在城市建成区外围,受人为活动影响强烈^[1],是森林资源的重要基础,在“海绵城市”“森林城市”、生态文明建设和低碳绿色发展中具有举足轻重的作用^[2-3]。当前,提升森林质量已经成为我国林业高质量发展的重要内容之一^[3]。土壤肥力质量是土壤质量的重要维度之一,其高低直接影响林地生产力^[4-5]。受人口密度等社会经济因素的影响,城市土壤质量,尤其是超大城市土壤质量往往呈现出不同的特点^[6-7]。因此,全面掌握城市林地土壤肥力对认识城市林地土壤质量、科学制定林业政策和提升森林质量具有重要的意义^[8]。

近些年来,不同规模城市林地土壤理化性质及其肥力评价开始得到重视。Yesilonis 等^[9]基于林地空间分布、地形等因素,选取美国中等城市巴尔的摩城区、郊区和农村 15 个采样地,对森林斑块表层土壤化学特征进行了调查和分析,发现城乡梯度和环境变化对于森林土壤发育有显著影响。周伟等^[10]基于网格布点法设置的 194 个样地的调查数据,采用全国第二次土壤普查土壤养分分级标准,评价了特大城市长春城市林地在不同行政区和不同林种下土壤容重、有机质等 9 个土壤肥力指标特征,发现长春城市林地土壤有机质含量达到一级水平,全氮、碱解氮、速效磷含量均达到三级以上水平,速效钾含量达到一级水平,土壤 pH 为 5.43~8.89,容重为 1.11~1.62 g/cm³,内梅罗综合指数评价结果为土壤肥力中等。黄菲等^[11]基于林种布设 184 个采样地,对大城市南昌不同林种土壤肥力特征和综合肥力进行了调查和评价,发现南昌城市林地土壤速效磷含量均达到三级以上水平,土壤有机碳和全氮含量均达到四级水平,内梅罗综合指数评价结果为土壤肥力中等。但以上城市林地土壤肥力特征

与综合评价研究主要存在两个方面的问题:一是采用网格布点法或选择典型林种(树种)设置采样地,忽略了人口密度的影响;二是研究区多集中在中等城市、大城市和特大城市,而超大城市全域范围内的林地土壤肥力特征和评价研究缺乏。

上海是中国的超大城市和金融中心,已成为世界上经济最发达、人口最密集的地区之一^[6],对森林质量要求更高^[12]。但上海林地多由工业废弃地、填埋场或农用地转化而来^[13],其本底土壤肥力质量总体不佳^[14-15],导致森林质量不容乐观^[13]。因此,本研究以上海城市林地为研究对象,根据上海各行政区林地规模、人口密度和林种重要性,采用分层抽样法布设 632 个样点,主要研究以下科学问题:上海城市林地土壤肥力状况如何?行政区划和林种对土壤肥力是否有影响?当前影响上海城市林地土壤肥力提升的关键障碍因子是什么?

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

上海市(120°52'E~122°12'E, 30°40'N~31°53'N)位于长江中下游东部平原,地形平坦,水网纵横交错,属亚热带季风气候,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,年气温变幅为 -2.8~37.7 °C,平均气温 17.3 °C,年平均降水量 1 409.1 mm,年平均蒸发量 1 129.6 mm。土壤类型主要为水稻土、灰潮土和滨海盐土^[5]。截至 2023 年年底,上海森林面积达到 192.78 万亩(1 亩=667 m²),森林覆盖率为 18.81%,主要分布在崇明、浦东、闵行、奉贤、金山、松江、青浦、嘉定和宝山 9 个行政区。根据管理需要,林种主要分为水源涵养林、防护林、环境保护林、开放休闲林和其余林 5

大类。

1.2 样点布设及样品采集与处理

采用分层抽样法布设样点:基于第三次国土调查获取的林地图斑,以林种、各行政区人口密度和土属分别作为分层抽样的第一层、第二层和第三层,布设 632 个样点(图 1)^[16]。其中,水源涵养林 130 个、防护林 271 个、环境保护林 76 个、开放休闲林 62 个和其余林 93 个。每个样点采用梅花法设置 5 个子样点,每个子样点分别采集 0~20 cm 环刀样、分析样,5 个子样点分析样采用四分法缩分混合成一个样。环刀样用于测定容重和非毛管孔隙度;分析样去除其中的根系、石块等杂物,风干、研磨后分别过 2、1 和 0.149 mm 网筛,用于测定土壤质地、化学性质和养分指标^[12]。

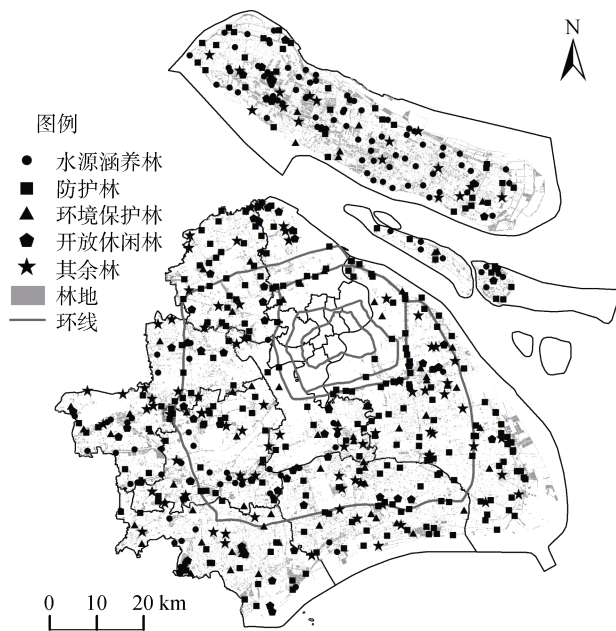


图 1 上海典型城市林地土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in urban forest of Shanghai

1.3 测定指标与方法

由于土壤总孔隙度和毛管孔隙度不是绿化造林标准关注的重点,因此,本研究仅选取土壤质地、容重和非毛管孔隙度表征土壤物理性质^[17]。土壤质地(ST)采用密度计法测定,土壤容重(BD)、非毛管孔隙度(NP)采用环刀法测定^[18]。土壤 pH 采用点位法测定,电导率(EC)采用电导率仪(MP515-02,上海铂勒机电设备有限公司)测定,阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定,土壤有机质(SOM)含量采用重铬酸钾外加热法测定,碱解氮(AN)采用碱解-扩散法测定,有效磷(AP)采用钼锑抗比色法测定,速效钾(AK)采用乙酸铵提取法测定^[19]。

1.4 土壤肥力评价

1.4.1 土壤肥力单项指标评价 鉴于城市林地土壤领域并无明确的土壤分级标准,本研究综合运用第二次全国土壤普查养分分级标准和城市绿化土壤领域相关标准^[17]。其中,土壤质地、电导率分级参照 DB31/T 1191—2019《绿化土壤肥力质量综合评价方法》^[19],容重、pH、阳离子交换量、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾分级参照全国第二次土壤普查中的土壤各指标分级标准^[10];非毛管孔隙度分级参照 CJ/T 340—2016《绿化种植土壤》^[17]。具体指标分级见表 1~表 3。

表 1 土壤质地分级及其标准化

Table 1 Grading and standardization of soil texture

指标	一级	二级	三级	四级	五级	六级
ST	壤土	粉壤土、砂黏壤土、砂黏土、粉土、黏壤土、粉黏土、壤砂土	粉砂壤	粉黏壤土		
标准化系数	3	2.7	2	1.3	1	0

注: ST 为土壤质地;下同。

表 2 土壤其他理化性质分级标准

Table 2 Classification standards for other soil physicochemical properties

指标	等级						标准化系数		
	一级	二级	三级	四级	五级	六级	X_a (差)	X_c (中)	X_p (优)
BD (g/cm ³)	<1 (过松)	1.00~1.25 (适宜)	1.25~1.35 (偏紧)	1.35~1.45 (紧实)	1.45~1.55 (过紧实)	>1.55 (坚实)	1.45	1.35	1.25
NP (%)	15~25	10~15	5~10	<5	—	—	5	10	15
pH	<4.5 (强酸)	4.5~5.5 (酸性)	5.5~6.5 (微酸)	6.5~7.5 (中性)	7.5~8.5 (弱碱)	>8.5 (碱性)	4.5 9*	5.5 8*	6.5 7*
EC (mS/cm)	0.3~0.5	0.1~0.3	0.5~0.7 或 0.07~0.1	0.7~0.9	0.9~1.2 或 0.05~0.07	>1.2 或 ≤0.05	0.1 1.8*	0.35	0.5 1.2*
CEC (cmol/kg)	>20 (强)	15~20 (较强)	10~15 (中等)	5~10 (偏弱)	≤5 (弱)	—	5	10	15

注: BD 为容重, NP 为非毛管孔隙度, EC 为电导率, CEC 为阳离子交换量;下同。在 pH 标准化系数中,不带*的表示在 pH≤7 条件下,带*的表示在 pH>7 条件下。在 EC 标准化系数中,不带*的表示在 EC≤0.5 mS/cm 条件下,带*的表示在 EC>0.5 mS/cm 条件下。

表 3 土壤有机质和养分分级
Table 3 Classification standards for soil organic matter and nutrients

指标	等级						标准化系数		
	极丰富	丰富	中等	缺乏	很缺乏	极缺乏	X_a (差)	X_c (中)	X_p (优)
SOM (g/kg)	>40	30~40	20~30	12~20	6~12	<6	10	20	30
TN(g/kg)	>2	1.5~2	1~1.5	0.75~1	0.5~0.75	<0.5	0.75	1.5	2
AN (mg/kg)	>150	120~150	90~120	60~90	30~60	<30	40	80	120
AP (mg/kg)	>40	20~40	10~20	10~5	3~5	<3	5	10	20
AK (mg/kg)	>200	150~200	100~150	50~100	30~50	<30	60	120	250

注：SOM 为土壤有机质，TN 为全氮，AN 为碱解氮，AP 为有效磷，AK 为速效钾；下同。

1.4.2 土壤肥力质量综合评价 通过标准化消除各评价指标之间量纲的差别，土壤质地标准化参照 DB31T1191—2019《绿化土壤肥力质量综合评价方法》^[19]中的各指标标准化系数(表 1)。采用隶属函数法分别对其他 10 个指标进行标准化(表 2 和表 3)。其中，容重、pH 标准化公式见文献[20]，电导率标准化公式见文献[21]，其余指标标准化公式见文献[10]。

采用改进的内梅罗综合指数法进行土壤肥力质量综合评价^[5]，计算公式如下：

$$F = \sqrt{\frac{(\bar{F}_i)^2 + (F_{i,\min})^2}{2}} \times \frac{(n-1)}{n}$$

式中： F 为土壤肥力质量综合指数； \bar{F}_i 为各指标标准化数值的均值； $F_{i,\min}$ 为各指标标准化数值的最小值。采用 $F_{i,\min}$ 代替原内梅罗公式中的 $F_{i,\max}$ 是为了突出土壤属性中最差一项指标对土壤肥力质量的影响；增加修正项 $(n-1)/n$ 是为了反映可信度，即参评土壤属性项目 (n) 越多，可信度越高。

本研究将土壤肥力质量划分为 4 个等级： $F \geq 2.7$ ，很肥沃； $1.8 \leq F < 2.7$ ，肥沃； $0.9 \leq F < 1.8$ ，中等； $F < 0.9$ ，贫瘠。

1.5 数据统计分析

采用 Excel 2021 和 Origin2021 进行土壤肥力特征统计分析和作图。在 SPSS 26.0 中，利用单因素方差分析进行不同行政区、林种土壤肥力综合指数显著

性差异检验，采用 Pearson 法进行土壤肥力指标与土壤肥力综合指数的相关性分析，运用逐步线性回归法分析土壤肥力指标对土壤肥力的重要性。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力特征描述性统计

2.1.1 土壤物理性质 由表 4 和图 2 可知，上海城市林地土壤质地整体处于三级等级，以粉砂壤土和粉砂黏壤土为主，主要分布在二级和三级，分别占比 48.1% 和 43.04%；土壤容重整体处于紧实等级(四级)，容重均值达 1.43 g/cm^3 ，主要分布在紧实和过紧实等级，分别占比 35.76% 和 36.07%；土壤非毛管孔隙度整体处于四级等级，均值仅为 1.05%，其中四级(最低等级)占比达 99.68%。

2.1.2 土壤化学性质 上海城市林地土壤化学性质统计特征见表 5 和图 3。由此可知，土壤 pH 均值 7.83，整体处于五级(弱碱)，其中五级占比 53.95%；土壤电导率适中，整体处于二级，主要分布在二级和三级，分别占比 57.12% 和 20.41%；土壤 CEC 整体处于四级(中等)，主要分布在二级和三级，分别占比 27.69% 和 49.68%。

2.1.3 土壤养分特征 上海城市林地土壤养分统计特征见图 4 和表 6。由此可知，土壤有机质含量整体处于缺乏等级，其中缺乏等级占比达 41.13%；全氮含量 (1.15 g/kg) 整体处于中等等级，其中中等等

表 4 上海城市林地土壤物理性质统计特征
Table 4 Statistical characteristics of soil physical properties of urban forest land of Shanghai

土壤指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数(%)	整体等级
Sand (g/kg)	47.52	839.02	194.71	105.41	54.14	三级(质地)
Silt (g/kg)	60.82	758.00	541.29	106.38	19.65	
Clay (g/kg)	19.00	485.10	255.79	72.84	28.48	
BD (g/cm^3)	0.79	1.68	1.43	0.10	6.99	四级(紧实)
NP (%)	0.13	5.65	1.05	0.60	57.14	四级

注：表中 Sand、Silt、Clay 分别表示砂粒、粉粒、黏粒含量，下同。

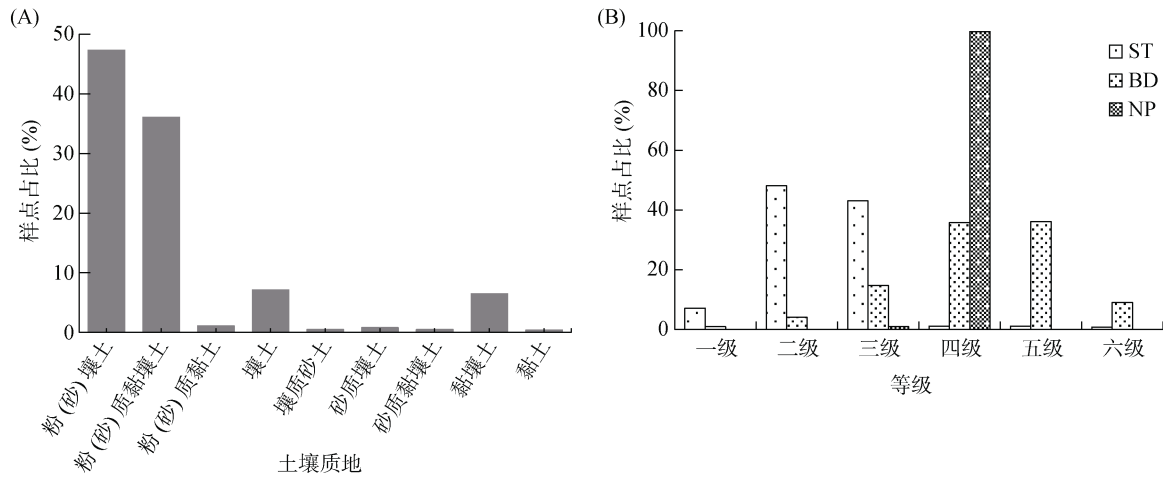


图 2 上海城市林地土壤质地分布频率(A)和其他物理性质(B)等级分布
Fig. 2 Distributions of soil texture frequency(A)and other physical property grades(B)of urban forests of Shanghai

表 5 上海城市林地土壤化学性质统计特征
Table 5 Statistical characteristics of soil chemical properties of urban forest land of Shanghai

指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数(%)	整体等级
pH	4.97	9.07	7.83	0.73	9.32	五级(弱碱)
EC (mS/cm)	0.02	0.77	0.12	0.07	58.33	二级
CEC (cmol/kg)	3.19	22.6	13.19	3.64	27.60	四级(中等)

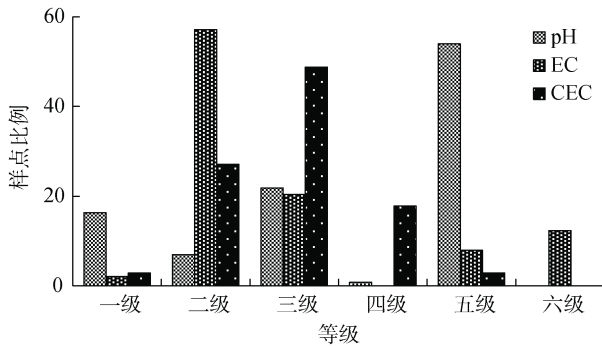


图 3 上海城市林地土壤化学性质等级分布
Fig. 3 Grade distributions of soil chemical properties in urban forest land of Shanghai

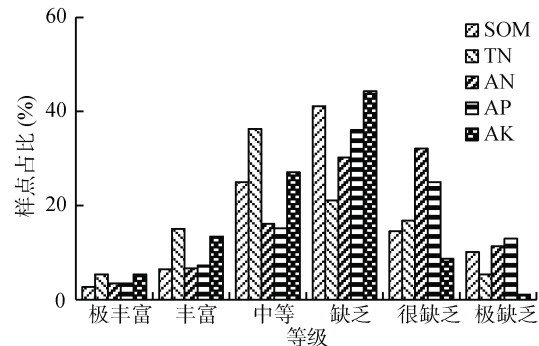


图 4 上海城市林地土壤养分等级分布
Fig. 4 Grade distributions of soil nutrients of urban forest land of Shanghai

表 6 上海城市林地土壤养分性质统计特征
Table 6 Statistical characteristics of soil nutrients of urban forest land of Shanghai

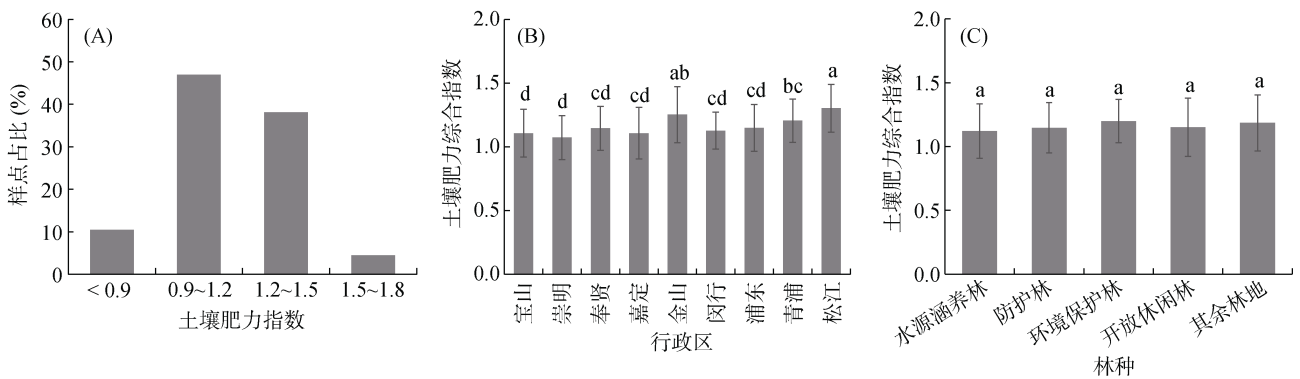
指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数(%)	整体等级
SOM (g/kg)	0.38	64.54	17.29	9.8	56.68	缺乏
TN (g/kg)	0.18	4.11	1.15	0.51	44.35	中等
AN (mg/kg)	5.17	689.00	71.04	44.27	62.32	缺乏
AP (mg/kg)	0.74	323.72	11.23	22.18	197.51	中等
AK (mg/kg)	18.2	406.05	106.21	52.25	49.19	中等

级占比为 36.28%；碱解氮含量整体处于缺乏等级，主要分布在缺乏和很缺乏等级，分别占 30.22% 和 32.12%；有效磷含量均值为 11.23 mg/kg，整体处于

中等等级，主要分布在缺乏和很缺乏等级，分别占 36.08% 和 25.00%；速效钾整体处于中等等级，但缺乏等级占比最高，为 44.3%。

2.2 土壤肥力质量综合评价

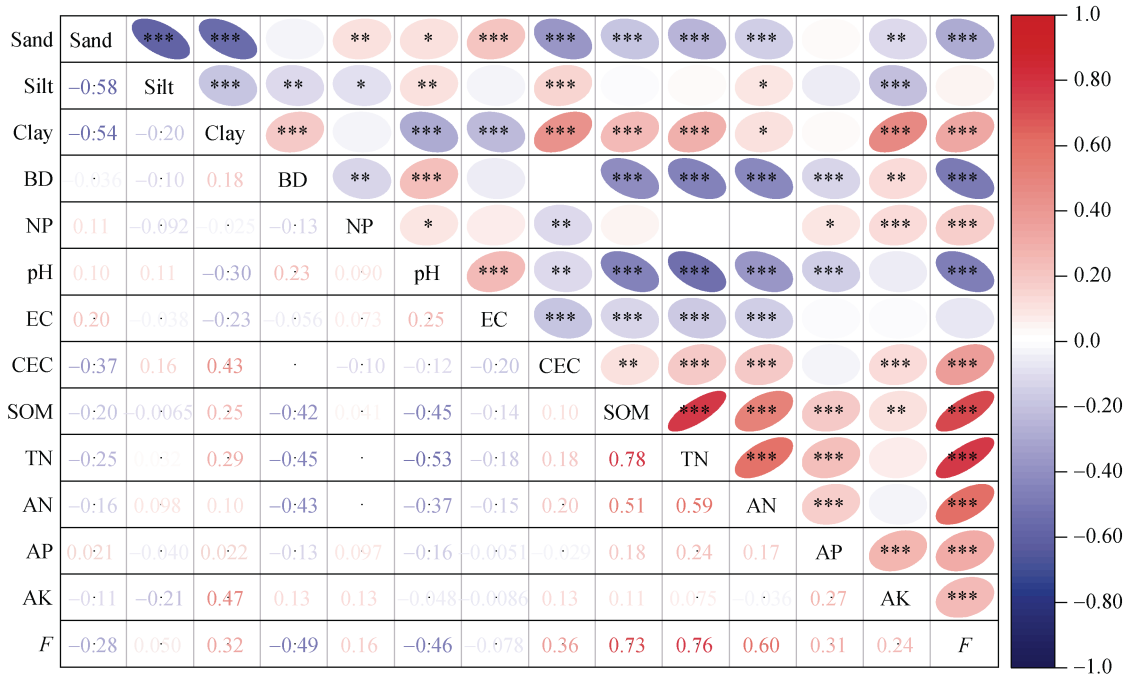
由图 5A 可知，上海城市林地土壤肥力质量中等偏低，主要分布在中等(0.9≤F<1.2)等级，占比 46.99%。松江区、金山区和青浦区林地土壤肥力综合指数显著高于宝山区和崇明区，不同行政区土壤肥力综合指数从高到低依次为：松江区(1.30) >金山区(1.25)>青浦区(1.21)>浦东新区(1.15)、奉贤区(1.15)>闵行区(1.13) >嘉定区(1.11)、宝山区(1.11) >崇明区(1.07)(图 5B)。不同林种土壤肥力综合指数无显著性差异，土壤肥力综合指数从大到小依次为环境保护林(1.20)>其余林(1.18)>防护林、开放休闲林(1.15)>水源涵养林(1.12)(图 5C)。



(图中不同小写字母表示不同行政区或林种间差异显著(P<0.05))

图 5 上海市、不同行政区和林种林地土壤肥力质量状况

Fig. 5 Soil fertility quality statuses of forest forests of whole city, administrative regions and forest types of Shanghai



(*、**、***分别表示相关性在 P<0.05、P<0.01、P<0.001 水平显著)

图 6 土壤肥力指标皮尔逊相关性分析

Fig. 6 Pearson correlation analysis among soil fertility indicators

表 7 上海城市林地土壤肥力指标与综合肥力指数逐步线性回归结果

Table 7 Results of stepwise linear regression coefficients between soil fertility indicators and comprehensive fertility index of urban forest land of Shanghai

序号	自变量	标准化系数	显著性	序号	自变量	标准化系数	显著性
1	Zscore(Clay)	-0.104	0.01	8	Zscore(CEC)	0.263	0.00
2	Zscore(Sand)	-0.152	0.00	9	Zscore(SOM)	0.300	0.00
3	Zscore(Silt)	-0.074	0.034	10	Zscore(TN)	0.256	0.00
4	Zscore(BD)	-0.145	0.00	11	Zscore(AN)	0.146	0.00
5	Zscore(NP)	0.130	0.00	12	Zscore(AP)	0.095	0.00
6	Zscore(pH)	-0.096	0.00	13	Zscore(AK)	0.149	0.00
7	Zscore(EC)	0.096	0.00				

注：表中 Zscore 表示土壤肥力指标标准化得分。

方程决定系数 $R^2=0.793$ ，有机质、阳离子交换量和全氮对土壤肥力质量的影响较大，标准化值分别达到了 0.300、0.263 和 0.256。

3 讨论

3.1 上海典型城市林地土壤肥力特征

本研究发现，上海城市林地存在土壤紧实、通透性差、有机质和碱解氮缺乏等质量问题。以土壤容重为例，当其达到 1.4~1.5 g/cm³ 时，植物根系生长受限^[10]。但上海城市林地土壤容重均值为 1.43 g/cm³，紧实和过紧实的比例共达 71.83%(表 4)，已经达到了植物根系难以进入的程度。该研究结果与南京城市林地土壤 (1.42 g/cm³)接近^[20]，但明显比北京(1.28 g/cm³)^[22]、长春(1.38 g/cm³)、哈尔滨(1.37 g/cm³)^[23]、广州(1.30~1.43 g/cm³)^[21]和南昌(1.30 g/cm³)^[11]等城市林地土壤高。非毛管孔隙又称大孔隙，指孔径大于 1 mm 的土壤孔隙，其数量取决于土壤的结构，它不具有持水能力，但能使土壤通气、透水^[21]。CJ/T 340—2016《绿化种植土壤》^[17]要求非毛管孔隙度≥5%，但本研究结果仅为 1.05%，显著低于南京城市林地土壤 (5.54%)^[20]。在土壤质地类似、容重相当，但土壤有机质含量高于南京城市林地土壤的情况下，上海城市林地土壤非毛管孔隙度明显偏低，这种现象有待进一步研究。上海城市林地土壤有机质含量均值为 17.29 g/kg，高于南京(13.84 g/kg)和长沙城市林地土壤(13.84 g/kg)，与北京城市林地土壤 (18.29 g/kg)^[22]接近，但低于长春(34.51 g/kg)、哈尔滨(34.26 g/kg)^[23]和南昌城市林地土壤(28.89 g/kg)^[11]。上海城市林地土壤碱解氮 (62.32 mg/kg)处于缺乏的状态，低于长春(133.04 mg/kg)、哈尔滨(124.43 mg/kg)和北京城市林地土壤(75.99 mg/kg)，但比长沙城市林地土壤(21.17 mg/kg)高。

与国内其他城市相比，上海城市林地土壤物理结构较差、土壤养分偏低等障碍因子出现的原因可能主

要与其用地来源和造林条件有关。上海天然林分布极为稀少，从 20 世纪 90 年代开始大规模造林，其中大多数造林地来自农田。上海农田以水旱轮作为主，土壤肥力特征好于林地，如全市农田土壤有机质含量达 26.37 g/kg，碱解氮含量达 167.1 mg/kg^[24]。农田转变为林地后，由传统的水旱轮作变为常年旱作，有机质快速分解，土壤肥力逐渐下降，土壤出现板结^[25]。造林过程中机械压实和人为践踏也会导致土壤物理性质退化。同时，上海现有的林地仍以中幼龄林为主，林地土壤发育尚不完全^[13]。近些年来，城市搬迁地也逐步被用作造林地，但城市搬迁地普遍立地条件不佳，土壤侵入体多，肥力状况总体也比较恶劣^[14]。此外，由于大规模的城市开发建设，部分城市林地受到明显的人为扰动，养护管理措施不到位，也进一步限制了其土壤肥力特征的改善。

3.2 上海典型城市林地土壤肥力综合评价

本研究发现，上海城市林地土壤肥力综合指数为 1.15，与南京城市林地土壤相近(1.19)，但显著低于南昌(1.27)^[11]、长春(1.55~1.65)、哈尔滨(1.41~1.59)^[23]等城市林地土壤。这可能和上海造林地原生土壤有机质含量低、造林年限短和植被类型有关^[13]。有机质对土壤肥力的影响极大(表 7)，不同城市之间，土壤有机质含量差异显著^[21]，而上海城市林地土壤有机质含量在本研究中提及的城市中排名靠后。造林年限是影响有机质含量的重要因素之一，即使受到人为活动强烈影响，土壤有机质也会随着时间的变化而增加^[26]。但上海超过 80% 的林地造林年限不足 30 年^[27]，低于北方城市和区域^[28-29]。植被类型也是影响有机质积累的重要因素，对有机质积累的影响排序依次为：针阔混交林>常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林^[30]。上海林地植被类型主要以常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和落叶针叶林为主^[31]，有机质积累效率低于针阔混交林。

上海不同行政区城市林地土壤肥力质量综合指数存在显著性差异,与长春的研究结果相似,且土壤肥力综合指数变幅达0.23,比长春(0.18)高27.78%,这可能和上海不同行政区土壤发育时间不同有关。青浦、松江、金山三地土壤发育于6000年前,嘉定、闵行、奉贤土壤发育于3000年前,崇明和浦东土壤发育于1400年前^[32]。青浦、松江、金山等行政区土壤由于长期利用,土壤肥力明显高于其他行政区^[24,33-34]。通常情况下,由于人为活动、施肥等管理措施不同,不同林种土壤肥力往往呈现出显著性差异^[10]。但本研究发现,不同林种土壤肥力综合指数无显著性差异。这可能与上海各林种在涉林行政区内均有分布有关。虽然不同行政区土壤肥力差异显著(图5),但同一行政区内不同林种土壤肥力可能差异较小^[21]。

3.3 上海典型城市林地土壤肥力改良提升

本研究发现,土壤容重与有机质、全氮和碱解氮含量显著负相关,与广州^[21]的研究结果相似。土壤非毛管孔隙度与有机质含量相关性不显著,与广州^[21]的研究结果不同,但与上海外环线带^[5]的研究结果类似。这可能是因为上海土壤有机质含量总体较低,土壤板结严重,因此土壤非毛管孔隙度主要受土壤机械组成影响(图8)。有机质和全氮含量与土壤肥力综合指数的相关系数高于其他指标(图8),逐步线性回归分析结果也表明有机质、阳离子交换量和全氮的系数最高。这说明当前限制上海城市林地的主要土壤障碍因子是有机质和全氮,有机质是关键障碍因子。本研究结果与长春^[10]的研究结果不同。全氮和容重是限制长春城市林地土壤肥力的最主要因子^[10]。这可能是因为土壤障碍因子确定的方法和限制因子的数量不同。本研究综合 Pearson 相关性分析和逐步线性回归分析来确定关键障碍因子,相比修正的内梅罗公式,综合考虑了土壤肥力特征之间的相关关系及其对肥力综合指数的影响程度,降低了指标之间共线性的影响。上海城市林地偏低或偏差的土壤肥力指标数量较多,如容重、非毛管孔隙度、有机质、碱解氮等(表4~表6),但有机质对土壤肥力的影响程度最大(表7)。

施用有机物料是提升土壤肥力的重要措施^[35-37]。有机物料类型、施用方式和用量和均会影响土壤肥力提升效果。采用传统有机肥提升城市林地土壤肥力,不仅成本高,还面临土壤污染的风险^[38]。有机固体废物资源化利用是大型城市面临的重要问题^[39],其中绿化废弃物和湿垃圾已经进行了资源化利用研究。相较于传统有机肥,绿化废弃物堆肥和湿垃圾堆

肥成本低廉、环境友好^[40]。在施用方法上,绿化废弃物可作为覆盖物利用,也可制成堆肥利用^[41-42]。湿垃圾沼渣堆肥可通过沟施提升改良效率^[43]。虽然有机物料提升土壤肥力的效果较好,但用量过多反而会影影响植物生长,需要通过研究确定合理的用量^[44]。此外,虽然非毛管孔隙度偏低不是限制上海城市林地土壤肥力的关键障碍因子,但考虑到上海降雨量大,地下水埋深浅^[45],需要增加非毛管孔隙度来提升土壤渗透性,可将多孔改良材料与有机物料复配施用快速提升土壤非毛管孔隙度^[5,46]。

4 结论

1) 上海城市林地土壤质地以壤土类为主,土壤容重偏高,非毛管孔隙度偏低;土壤 pH 4.97~9.07,整体偏碱性,电导率适中,阳离子交换量中等;土壤全氮含量中等,有效磷、速效钾含量中等偏下,有机质、碱解氮含量缺乏;土壤肥力中等偏低。

2) 行政区划对土壤肥力有显著影响,不同林种对土壤肥力则无影响。

3) 有机质是当前上海城市林地土壤肥力提升的关键障碍因子。

参考文献:

- [1] 王庆飞,郝泽周,李乐,等. 广州城市森林主要林型可燃物空间分布与燃烧性等级[J]. 生态学杂志, 2025, 44(3): 780-789.
- [2] 廖文梅,郑希贤,徐彩瑶,等. 创建国家森林城市居民福祉改善效应: 一个政策的准自然实验分析[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5202-5215.
- [3] 中共中央办公厅,国务院办公厅. 关于全面推行林长制的意见[EB/OL]. (2021-01-12)[2025-06-15], <https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/45503.jhtml>.
- [4] 贾国建,杜振宇,马丙尧,等. 山东省长期连作杨树人工林的土壤理化特性与综合肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2023(4): 8-15.
- [5] 于全波,仲启铨,李镛汐,等. 上海外环线带典型绿地土壤质量综合评价[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1077-1083.
- [6] 雒淑红,林勇,陈瑞蕊,等. 社会经济因素对上海绿地土壤致病真菌群落多样性和组成的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1965-1973.
- [7] Luo S H, Chen R R, Han J G, et al. Urban green space area mitigates the accumulation of heavy metals in urban Luo [6]Luo S, Chen R, Han J, et al. Urban green space area mitigates the accumulation of heavy metals in urban soils[J]. Chemosphere, 2024, 352: 141266.
- [8] 于路加,王翠平,马海军,等. 银川市黄河滩地土壤性状空间分布特征与肥力质量评价[J]. 土壤, 2024, 56(1): 202-213.

- [9] Yesilonis I, Giorgio V, Hu Y H, et al. Changes in soil chemistry after 17 years in urban and rural forest patches[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 786809.
- [10] 周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价[J]. *生态学报*, 2017, 37(4): 1211-1220.
- [11] 黄菲, 张佛熠, 钟嘉琳, 等. 南昌城市森林土壤肥力综合评价及其空间分布特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2024, 44(8): 129-138.
- [12] 上海市林长制办公室. 2025 年上海市林长制工作要点 [EB/OL]. (2025-04-01) [2025-06-15], <https://lhsr.sh.gov.cn/lhgl/20250401/6f02177c-a311-4753-8ea6-79f6e6dabe19.html>.
- [13] 张彪, 谢紫霞, 高吉喜. 上海城市森林植被固碳功能及其抵消能源碳排放效果评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(22): 8906-8920.
- [14] 梁晶, 伍海兵, 张浪. 城市典型搬迁地土壤质量特征及绿化障碍因子研究[J]. *中国园林*, 2021, 37(12): 38-42.
- [15] 伍海兵, 何小丽, 梁晶. 园林绿化用搬迁地土壤肥力综合评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(5): 1076-1081.
- [16] 林勇, 张浪, 于全波, 等. 一种城市林地土壤质量监测布点方法: CN117521336A[P]. 2024-02-06.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿化种植土壤: CJ/T 340—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] 张万儒. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [19] 上海市市场监督管理局. 绿化土壤肥力质量综合评价方法: DB31/T 1191—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [20] 单奇华, 李卫正, 俞元春, 等. 南京城市林业土壤的肥力特征分析[J]. *江西农业大学学报*, 2008, 30(1): 86-89, 98.
- [21] 崔诚, 李铤, 洗卓慧, 等. 广州南沙区 4 种典型城市林业土壤质量调查研究[J]. *生态科学*, 2022, 41(1): 186-195.
- [22] Mao Q Z, Huang G L, Buyantuev A, et al. Spatial heterogeneity of urban soils: The case of the Beijing metropolitan region, China[J]. *Ecological Processes*, 2014, 3(1): 23.
- [23] 周伟. 哈尔滨及长春城市森林绿地土壤肥力评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [24] 吴卫贤, 徐培培, 施俭, 等. 崇明县农田土壤肥力变化趋势分析与改善对策[J]. *上海农业科技*, 2016(3): 103-104.
- [25] Xu L Y, Wang M Y, Shi X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631: 1243-1250.
- [26] 马想, 张浪, 黄绍敏, 等. 上海城市绿地土壤肥力变化分析[J]. *中国园林*, 2020, 36(5): 104-109.
- [27] 张现武. 上海市国土绿化的矛盾运动分析[J]. *国家林业和草原局管理干部学院学报*, 2020, 19(1): 13-17.
- [28] 张林, 齐实, 周飘, 等. 北京山区针阔混交林地土壤有机碳含量的影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(3): 450-458.
- [29] 刘经纬, 赵光影, 刘永祥, 等. 1994 年-2018 年东三省森林碳储量动态变化研究[J]. *环境科学与管理*, 2022, 47(12): 163-167.
- [30] 王艺杰, 于丽君, 张稳, 等. 造林后表层土壤有机碳变化及影响因素分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(2): 103-111.
- [31] 徐嘉艺, 王小玲, 宋坤, 等. 上海四种常见树种单株固碳能力差异及其影响因子[J]. *生态学报*, 2024, 44(13): 5532-5541.
- [32] 傅明华, 李正毅, 汪超俊, 等. 上海地区土壤发生发育的初步研究[J]. *上海农业科技*, 1979(12): 1-4.
- [33] Li H B, Yang R S, He M, et al. The fertility characteristics of the agricultural soils from the inland plain region of Shanghai, China[C]//2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. June 18-20, 2010, Chengdu, China. IEEE, 2010: 1-8.
- [34] 杨业凤, 顾介明, 金叶华. 浅析浦东新区农田土壤肥力变化情况[J]. *上海农业科技*, 2014(5): 107-108.
- [35] 张杰, 周佳, 王永敏, 等. 不同有机肥对酸性土壤团聚体形成稳定及周转的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1353-1367.
- [36] 王冰, 张宇辰, 王昕悦, 等. 持续低量有机肥与化肥配施对绿洲农田土壤肥力和多功能性的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(4): 1059-1071.
- [37] 曹雪莹, 谭长银, 杨佳, 等. 有机物料对农田土壤肥力及镉有效性的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(2): 367-374.
- [38] 姜蓉, 申思雨, 吕贻忠. 华北地区有机种植与常规种植土壤质量比较研究[J]. *土壤*, 2015, 47(4): 805-811.
- [39] 张浪, 韩继刚, 伍海兵, 等. 关于园林绿化快速成景配生土的思考[J]. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1264-1267.
- [40] 李松, 孙向阳, 李素艳, 等. 改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6): 1229-1235.
- [41] 顾兵, 吕子文, 梁晶, 等. 绿化植物废弃物覆盖对上海城市林地土壤肥力的影响[J]. *林业科学*, 2010, 46(3): 9-15.
- [42] 刘国梁, 吴伟, 李素艳, 等. 园林绿化废弃物堆肥配施化肥对土壤腐殖质碳组分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(12): 27-35.
- [43] 王小涵, 徐冰, 梁晶. 湿垃圾堆肥施用对林地土壤质量的长期效应研究[J]. *园林*, 2021, 38(12): 11-17.
- [44] 王小涵, 何小丽, 梁晶. 湿垃圾沼渣好氧发酵堆肥对三种园林植物生长影响研究[J]. *园林*, 2021, 38(10): 58-62.
- [45] 于全波, 张浪, 黄绍敏, 等. 城镇搬迁地土壤厚度划分与案例研究[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 1081-1086.
- [46] 房超, 李金鑫, 余鹏, 等. 基于泥炭土、蛭石和珍珠岩的混配对赤泥土壤化改良的试验研究[J]. *山东化工*, 2017, 46(6): 146-148.

(责任编辑: 于 飞)