

上海外环绿带典型绿地土壤质量综合评价^①

于全波^{1,2,4}, 仲启铖^{1,2,3*}, 李榕汐^{1,2}, 张琪^{1,2,4}, 马艳⁵

(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; 4 上海市绿地土壤质量专业技术服务平台, 上海 200232; 5 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082)

摘要: 为研究上海外环绿带土壤质量, 推进植被功能提升, 在上海外环绿带布设了 94 个点, 从土壤肥力质量、环境质量和健康质量 3 个方面, 综合评价了上海外环绿带土壤质量。结果表明: ①上海外环绿带土壤肥力质量堪忧, 土壤肥力质量指标主要分布在影响植被生长的四级、五级和六级, 78.7% 的采样点土壤肥力质量分布在“贫瘠”等级; ②土壤环境质量较好, 土壤环境质量指标主要分布在无污染的一级, 88.3% 的采样点土壤环境质量等级为“清洁”; ③土壤健康质量不容乐观, 72.6% 的采样点土壤健康质量分布在“很低”等级; ④容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、pH、有机质、碱解氮和有效磷是影响土壤肥力质量的主要因素, 土壤肥力质量也显著影响着土壤健康质量。上海外环绿带应通过施用有机无机材料, 全面提升土壤质量。

关键词: 环城绿带; 土壤质量; 单因子评价; 综合评价

中图分类号: S158 文献标志码: A

Comprehensive Evaluation of Soil Quality of Typical Green Spaces in Outer Green Belt of Shanghai

YU Quanbo^{1,2,4}, ZHONG Qicheng^{1,2,3*}, LI Rongxi^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2,4}, MA Yan⁵

(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; 4 Shanghai Professional Technical Service Platform for Green Space Soil Quality, Shanghai 200232, China; 5 Shanghai Urban Water Resources Development & Utilization National Engineering Center Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: To investigate soil quality of the outer green belt of Shanghai and promote the improvement of vegetation function, in this study, 94 points were set up in the outer green belt of Shanghai, and the comprehensive evaluations of soil quality were conducted in terms of soil fertility quality, environmental quality, and health quality. The results showed that: 1) soil fertility quality was worrying, soil fertility quality indicators were mainly distributed in the fourth, fifth and sixth levels that hinder vegetation growth, 78.7% of the sampling sites were in the poor level of soil fertility quality; 2) soil environmental quality was good, with soil environmental quality indicators were mainly distributed in the first level without pollution. The proportion of soil environmental quality classified as clean was 88.3%; 3) soil health quality was not optimistic, and mainly distributed in the very low level (accounting for 72.6%). 4) soil bulk density, total porosity, non-capillary porosity, pH, organic matter, alkaline nitrogen, and available phosphorus were the main factors affecting soil fertility quality, which also significantly affected soil health quality. To comprehensively improve soil quality of green belt of Shanghai, organic and inorganic materials should be applied combinedly.

Key words: Green belt around the city; Soil quality; Single factor evaluation; Comprehensive evaluation

^①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802601)、上海城投科技创新产业化引导项目(CTKY-CYHYD-2023-003)和上海市园林科学规划研究院青年启动项目(2021-2-1)资助。

* 通讯作者(zhongqc2015@hotmail.com)

作者简介: 于全波(1990—), 男, 山东费县人, 博士, 工程师, 主要从事土壤质量评价与改良研究。E-mail: yuquanbo1990@163.com

环城绿带是通过政策或立法的方式，在城市外围地区设立一定规模、连续或基本连续的、永久性的绿色开放空间^[1]。环城绿带将城市建成区与乡村进行分隔，能有效防止过度城市化、改善城市生态环境、保护区域生物多样性和增加城市游憩空间^[2]。环城绿带具有重要的生态服务价值，已在国内外许多城市建设应用^[3]。然而，近些年的快速城市化，导致环城绿带原有的功能无法满足城市发展的需要，一些超大城市已开始推动环城绿带功能提升。以上海市为例，2021 年发布的《环城生态公园带环上功能提升总体规划》(以下简称“总体规划”)，明确要求提升环城绿带植物多样性和景观效果。因此，亟需查清上海外环绿带土壤质量是否能满足植被提升需要。

以往学者多从土壤肥力质量、环境质量单方面或两方面结合评价土壤质量，如李鹏等^[4]基于 14 个理化指标构建的最小数据集综合评价北京山区不同植被恢复类型土壤质量，结果发现选择适宜的植被恢复类型是改善区域土壤质量的关键；段碧辉等^[5]从土壤肥力质量和环境质量两方面评价了荆门市耕地不同利用方式的土壤质量，结果发现，研究区耕地土壤质量较好，以中等为主。在城市土壤质量评价中，也多选择基本理化性质作为土壤质量表征指标^[6-7]，较少考虑土壤生物学指标^[8]。但土壤质量涵盖了土壤肥力质量、环境质量和健康质量 3 个维度，仅从土壤肥力质量和环境质量评价，无法全面反映土壤质量^[9]。近几年，城市绿地土壤健康质量概念与评价方法已初步建立^[10-11]，使得从土壤肥力质量、环境质量和健康质量 3 个方面综合评价绿地土壤质量成为可能。因此，本研究将从土壤肥力质量、环境质量和健康质量 3 个方面，综合评价上海外环绿带土壤质量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海市($120^{\circ}52'E \sim 122^{\circ}12'E$, $30^{\circ}40'N \sim 31^{\circ}53'N$)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。2019 年气温变幅为 $-2.8 \sim 37.7^{\circ}\text{C}$ ，平均气温 17.3°C ，年平均降水量 1409.1 mm ，年平均蒸发量 1129.6 mm ^[12]。土壤类型主要为水稻土、灰潮土和滨海盐土。上海环城绿带沿着外环线道路(A20)外侧布置，全长 98 km ，总面积 6208 hm^2 ，共包括 50 座公园。在研究区的 45 个公园绿地和 6 个道路绿地共布设采样点 94 个(图 1)。

1.2 土壤样品采集及处理

每个样点采用梅花布点法布设 5 个子样点，每个子样点分别采集 $0 \sim 20\text{ cm}$ 环刀样、分析样和微生物

样，分析样和微生物样均采用四分法混合得到一个样品。环刀样用于测定容重、孔隙度等基本物理指标；去除分析样中的根系、石块等杂物，风干、研磨后分别过 2 、 1 和 0.149 mm 网筛，用于测定土壤养分和重金属指标；微生物样在 4°C 保存，用于测定土壤微生物生物量碳等微生物学指标^[11]。

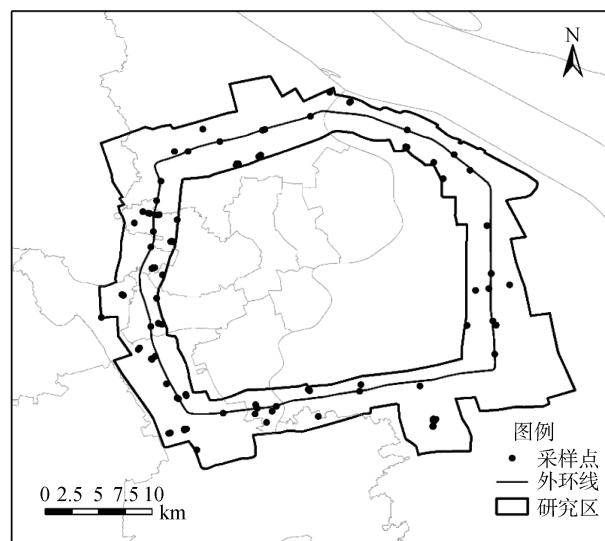


图 1 上海外环绿带研究区采样点分布
Fig. 1 Distribution of sampling points in research area of outer green belt of Shanghai

1.3 指标测定方法

土壤容重(BD)、总孔隙度(SP)和非毛管孔隙度(NP)采用环刀法测定^[13]。土壤 pH 采用电位法测定，EC 采用电导率仪测定，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^[14]。全 Cu、全 Zn、全 Pb、全 Cd、全 Cr 和全 Ni 采用火焰原子吸收分光光度法测定，全 Hg 采用热分解齐化原子吸收光度法测定，全 As 采用原子荧光法测定^[15]。土壤微生物生物量碳(MBC) 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[16]，土壤呼吸(SR)采用密闭静置培养二氧化碳法测定，脲酶(UR)采用比色法测定^[17]，木聚糖酶(XYL)采用改进的比色法测定^[18]。

1.4 土壤质量综合评价

1.4.1 土壤肥力质量评价 选择容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、pH、EC、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾进行土壤肥力质量单因子和综合评价。容重、pH、EC、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾指标分级参照 DB31/T 1191—2019《绿化土壤肥力质量综合评价方法》^[14]；土壤孔隙度分级参考文献[19]；非毛管孔隙度分级参照 CJ/T 340—2016《绿化种植土壤》^[20]；具体指标分级见表 1。

表1 土壤肥力质量单项指标分级
Table 1 Single indicator grades of soil fertility quality

指标	一级	二级	三级	四级	五级	六级
BD (g/cm ³)	1.0 ~ 1.15	1.15 ~ 1.25	1.25 ~ 1.35	1.35 ~ 1.45	1.45 ~ 1.55	>1.55
SP (%)	≥55	45 ~ 55	40 ~ 45	<40	-	-
NP (%)	15 ~ 25	10 ~ 15	5 ~ 10	<5	-	-
pH	6.5 ~ 7.5	5.5 ~ 6.5	7.5 ~ 8.0	8.0 ~ 8.5	8.5 ~ 9.0	>9.0
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
SOM (g/kg)	≥40	30 ~ 40	20 ~ 30	12 ~ 20	6 ~ 12	<6
AN (mg/kg)	≥200	120 ~ 200	90 ~ 120	60 ~ 90	40 ~ 60	<40
AP (mg/kg)	≥60	20 ~ 60	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5
AK (mg/kg)	≥300	200 ~ 300	100 ~ 200	60 ~ 100	30 ~ 60	<30

为消除各评价指标之间量纲的差别, 参照DB31T1191—2019《绿化土壤肥力质量综合评价方法》^[14]中的各指标分级, 采用隶属函数法对各指标进行标准化。容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾分级见表2。

表2 土壤肥力质量综合评价参数分级
Table 2 Grades of comprehensive evaluation parameters for soil fertility quality

指标	X _a (差)	X _c (中)	X _p (优)
BD (g/cm ³)	1.5	1.35	1.0
SP (%)	40	45	55
NP (%)	5	10	15
SOM (g/kg)	12	20	40
AN (mg/kg)	40	80	120
AP (mg/kg)	8	20	40
AK (mg/kg)	60	120	250

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, 计算公式如下:

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

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。

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。

1.4.2 土壤环境质量评价 参照CJ/T 340—2016《绿化种植土壤》^[20], 选择全Cu、全Zn、全Pb、全

Cd、全Cr、全Hg、全As和全Ni进行土壤环境质量单因子评价。为全面反映各污染物和主要污染物对土壤的影响, 采用改进的内梅罗综合污染指数法, 进行土壤环境质量综合评价^[21]。计算公式如下:

$$E = \sqrt{\frac{(\bar{E}_i)^2 + (E_{i,\max})^2}{2}} \quad (2)$$

$$E_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (3)$$

式中: E为土壤环境质量综合指数; \bar{E}_i 为第i个采样点中所有重金属元素单因子污染指数的平均值; $E_{i,\max}$ 为第i个采样点中所有重金属元素单因子污染指数的最大值; C_i 和 S_i 分别表示土壤重金属实测值和背景值(mg/kg)。

将土壤环境质量综合指数划分为4个等级: $E < 1$, 清洁; $1 \leq E < 2$, 轻度污染; $2 \leq E < 3$, 中度污染; $E \geq 3$, 重度污染。

1.4.3 土壤健康质量评价 根据康奈尔土壤健康评价方法^[11], 选择微生物生物量碳、土壤呼吸、脲酶和木聚糖酶4个指标, 进行土壤健康质量综合评价。具体步骤如下: 采用公因子方差法, 计算各指标权重^[11]; 按照权重从小到大的顺序, 排列各指标, 计算各指标累积频率; 将累积频率≤25%的指标, 赋值为1; 累积频率≥75%的指标, 赋值为10; 累积频率介于25%~75%的指标, 通过线性内插法, 赋予指标对应的内插值; 将各指标赋值加权求和, 即可得到土壤健康质量综合指数(H)。

土壤健康质量综合指数分级标准为: $H < 4.0$, 很低; $4.0 \leq H < 5.5$, 低; $5.5 \leq H < 7.0$, 中等; $7.0 \leq H < 8.5$, 较高; $H \geq 8.5$, 高。

1.5 数据统计分析

采用Excel 2021分析土壤肥力质量、环境质量

和健康质量指标的统计学特征并作图, 采用 SPSS 26.0 进行土壤质量指标相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力质量评价

研究区土壤肥力质量指标统计特征见表 3, 土壤肥力质量指标等级分布见图 2。上海外环绿带土壤容重普遍偏大, 均值为 1.42 g/cm^3 , 最大值达 1.71 g/cm^3 , 变异系数为 8.39%, 属于弱变异; 土壤容重主要分布三级、四级、五级和六级, 占比之和达 95.24%, 四级和五级占比最大, 均为 28.57%。总孔隙度偏低, 均值为 43.6%, 变异系数为 16.2%, 中等变异; 总孔隙度全部分布在二级、三级和四级, 二级占比为 50.0%。非毛管孔隙均值为 1.17%, 整体偏低, 变异

系数为 70.4%, 中等变异; 非毛管孔隙均分布在四级。

表 3 上海外环绿带土壤肥力质量指标统计特征

Table 3 Statistical characteristics of soil fertility quality indicators in outer green belt in shanghai

土壤肥力质量指标	变幅	均值±土标准差	变异系数(%)
BD (g/cm^3)	1.14 ~ 1.71	1.42 ± 0.12	8.39
SP (%)	16.0 ~ 53.5	43.6 ± 7.1	16.2
NP (%)	0.16 ~ 3.98	1.17 ± 0.82	70.4
pH	6.43 ~ 8.99	8.28 ± 0.37	93.7
EC (mS/cm)	0.022 ~ 0.383	0.084 ± 0.050	59.5
SOM (g/kg)	3.74 ~ 34.40	20.30 ± 6.12	156
AN (mg/kg)	16.4 ~ 222.0	63.3 ± 31.1	187
AP (mg/kg)	2.09 ~ 71.00	9.43 ± 9.30	218
AK (mg/kg)	28.3 ~ 257	115 ± 45.5	249
F	0.298 ~ 1.750	0.791 ± 0.224	27.4

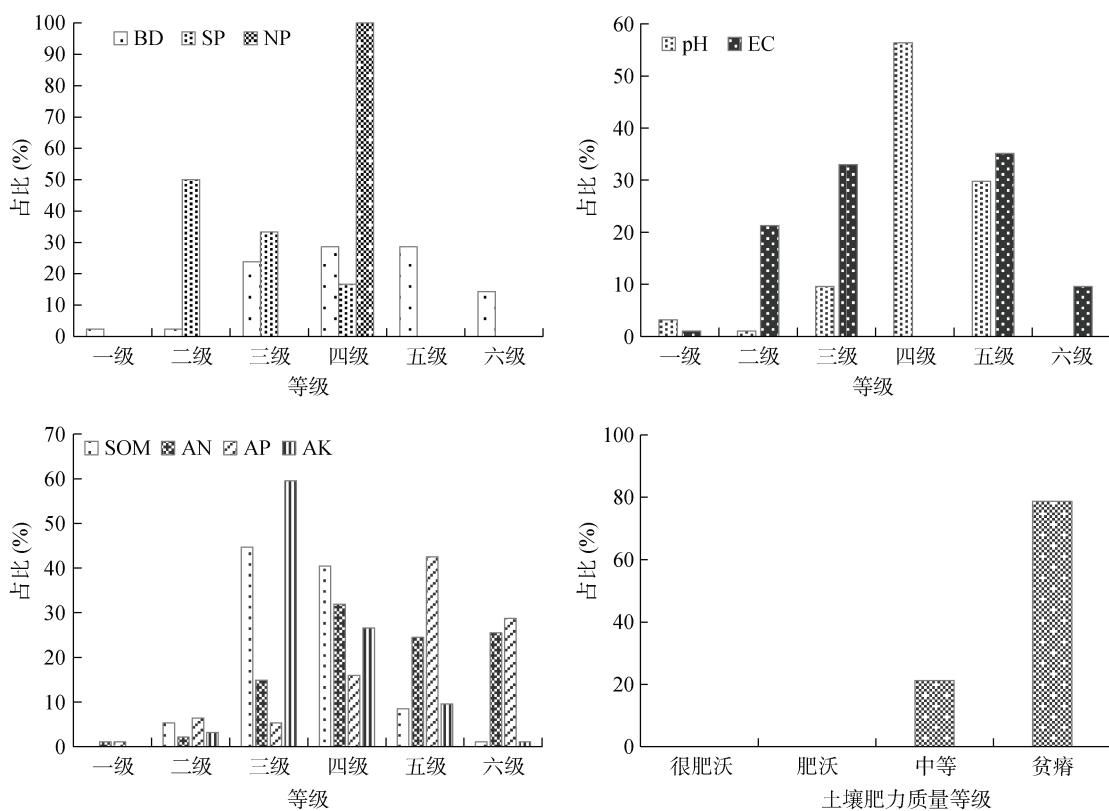


图 2 上海外环土壤肥力质量单因子和综合评价等级分布

Fig. 2 Distributions of single factor and comprehensive evaluation levels of soil fertility quality in outer green belt of Shanghai

上海外环绿带土壤 pH 偏高, 均值为 8.28, 总体呈碱性, 变异系数为 93.7%, 属于中度变异; pH 主要分布三级、四级和五级, 合计占比为 95.74%。EC 均值为 0.084 mS/cm , 整体偏低, 变异系数为 59.5%, 中度变异; EC 主要分布在二级、三级、五级和六级。有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均为高度变异。有机质均值为 20.3 g/kg , 总体尚可, 变异系数为 156%; 有机质主要分布在三级和四级, 占比分别为 44.7%

和 40.4%。碱解氮主要分布在四级、五级和六级, 分别占比 31.9%、24.5% 和 25.5%。有效磷主要分布在四级、五级和六级, 分别占比 16.0%、42.6% 和 28.7%。速效钾主要分布在三级和四级, 占比分别为 59.6% 和 26.6%。

上海外环绿带土壤肥力质量总体堪忧, 土壤肥力质量综合指数均值为 0.791, 变异系数为 27.4%, 中等变异。土壤肥力质量主要分布在“贫瘠”等级, 占

比 78.7%。

2.2 土壤环境质量评价

研究区土壤环境质量指标统计特征见表 4, 土壤环境质量指标单因子分级和综合分级见图 3。上海外环绿带全 Cu、全 Zn、全 Pb、全 Cd、全 Hg、全 Ni、全 As 和全 Cr 含量均值均低于 GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》要求的第二类筛选值^[15]。所有重金属含量等级主要分布在一级, 全 Cu 一级占比为 89.4%, 全 Zn 一级占比为 85.1%, 全 Cd 一级占比为 95.7%, 全 Ni 一级占比为 94.68%, 全 Pb、全 Hg、全 As 和全 Cr 均为 100%。

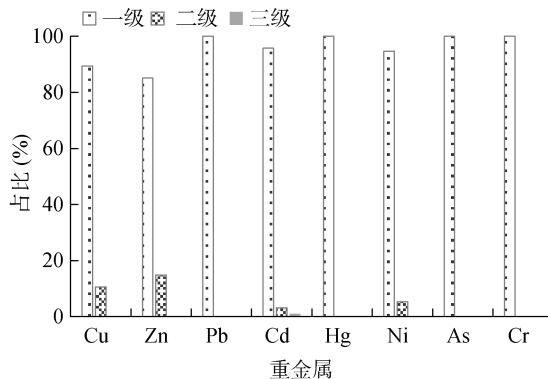


图 3 上海外环绿带土壤环境质量单因子和综合评价等级分布

Fig. 3 Distributions of single factor and comprehensive evaluation levels of soil environmental quality in outer green belt of Shanghai

土壤环境质量综合指数均值为 0.794, 变异系数为 24.5%, 中等变异; 土壤环境质量等级主要分布在“清洁”, 占 88.3%。

2.3 土壤健康质量评价

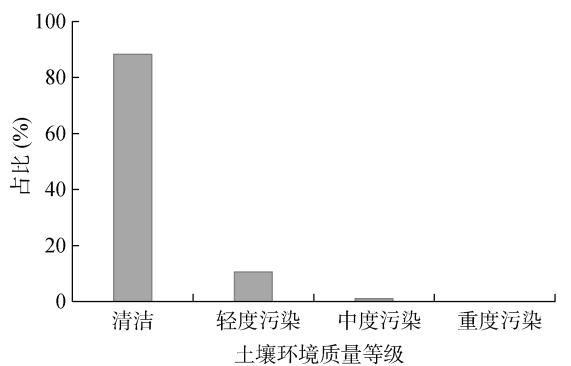
上海外环绿带土壤健康质量指标统计特征见表 5。上海外环绿带典型绿地土壤呼吸介于 0.002~0.022 mg/(g·h), 均值为 0.010 mg/(g·h); 土壤微生物生物量碳为 2.67~114.00 g/kg, 均值为 0.93 g/kg; 土壤脲酶介于 0.24~9.86 mg/(g·h), 均值为 2.55 mg/(g·h); 土壤木聚糖酶介于 0.001~6.060 mg/(g·h), 均值为 0.350 mg/(g·h)。土壤呼吸、微生物生物量碳和脲酶均为中等变异, 木聚糖酶为高度变异。

表 5 上海外环绿带土壤健康质量指标统计特征
Table 5 Statistical characteristics of soil health quality indicators in outer green belt of Shanghai

土壤健康质量指标	变幅	均值	变异系数(%)
SR (mg/(g·h))	0.002~0.022	0.010 ± 0.012	98.3
SMC (g/kg)	2.67~114.00	0.93 ± 0.69	73.9
UR (μmol/(g·h))	0.24~9.86	2.55 ± 2.44	95.7
XYL (μmol/(g·h))	0.001~6.060	0.350 ± 0.752	214
<i>H</i>	1.07~9.42	3.84 ± 2.53	65.9

表 4 上海外环绿带土壤环境质量指标统计特征
Table 4 Statistical characteristics of soil environment quality indicators in outer green belt of Shanghai

土壤环境质量指标	变幅	均值	变异系数(%)
Cu (mg/kg)	14.0~63.0	29.1 ± 8.7	29.7
Zn (mg/kg)	71.0~214.0	118.0 ± 31.0	26.3
Pb (mg/kg)	18.0~57.0	29.6 ± 7.3	24.7
Cd (mg/kg)	0.05~1.04	0.20 ± 0.12	60.0
Hg (mg/kg)	0.031~0.337	0.120 ± 0.060	50.0
Ni (mg/kg)	18.0~43.0	33.7 ± 4.2	12.5
As (mg/kg)	4.50~12.70	6.48 ± 1.30	20.1
Cr (mg/kg)	34.0~101.0	69.3 ± 13.0	18.8
<i>E</i>	0.536~2.000	0.794 ± 0.194	24.5



上海外环绿带土壤健康质量综合指数均值为 3.84, 总体不容乐观, 变异系数为 65.9%, 中等变异; 土壤健康质量等级主要分布在“很低”等级, 占比为 72.6%(图 4)。

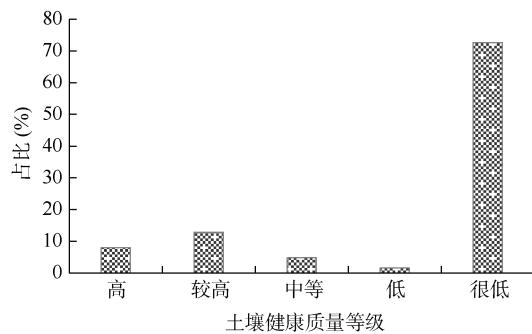


图 4 上海外环绿带土壤环境质量等级分布

Fig. 4 Distribution of soil environmental quality grades in outer green belt of Shanghai

2.4 土壤质量指标相关性分析

由于上海外环绿带土壤环境质量总体清洁, 故本研究重点分析了土壤肥力质量和健康质量指标对土壤质量的影响(表 6)。土壤肥力质量与总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质、碱解氮和有效磷呈显著正相关,

表 6 土壤质量指标相关系数
Table 6 Correlation coefficients among soil quality indicators

	BD	SP	NP	pH	EC	SOM	AN	AP	AK	SR	MBC	UR	XYL	F	E	H
BD	1															
SP	-0.837***	1														
NP	-0.189	0.178	1													
pH	0.109	-0.061	-0.263*	1												
EC	-0.003	0.01	0.367**	-0.036	1											
SOM	-0.320*	0.146	0.244	-0.503***	0.028	1										
AN	-0.434***	0.340**	0.300*	-0.276*	0.084	0.644***	1									
AP	-0.072	-0.045	-0.088	-0.578***	-0.097	0.365**	0.282*	1								
AK	0.224	-0.347**	-0.058	0.178	0.082	0.039	0.004	0.149	1							
SR	-0.096	0.017	0.108	0.432***	-0.044	0.035	0.148	-0.244	0.115	1						
MBC	0.176	-0.231	0.224	-0.072	0.048	-0.084	-0.095	0.153	0.161	-0.031	1					
UR	-0.268*	0.255*	-0.283*	0.009	-0.351**	0.237	0.351**	-0.013	0.103	0.007	-0.495***	1				
XYL	-0.108	-0.021	-0.035	-0.014	-0.035	0.056	-0.066	0.108	-0.028	-0.171	-0.077	0.008	1			
F	-0.687***	0.504***	0.414**	-0.400**	-0.007	0.656***	0.638***	0.339**	0.157	0.158	0.075	0.218	0.039	1		
E	-0.072	-0.028	-0.151	0.243	-0.142	0.061	0.082	-0.078	0.272*	-0.01	0.059	0.176	0.331**	0.073	1	
H	0.006	-0.174	0.09	0.058	-0.109	0.215	0.302*	0.17	0.277*	0.487***	0.17	0.173	0.183	0.325*	0.192	1

注：*、**、***分别表示相关性达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 显著水平。

与容重和 pH 呈显著负相关，相关系数分别为 0.504($P<0.001$)、0.414($P<0.01$)、0.656($P<0.001$)、0.638($P<0.001$)、0.339($P<0.01$)、-0.687($P<0.001$)、-0.400($P<0.01$)。土壤健康质量与土壤呼吸和肥力质量呈显著正相关，相关系数分别为 0.487($P<0.001$)和 0.325($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 上海外环绿带土壤物理性质亟需通过土壤改良改善

本研究表明，上海外环绿带土壤物理性质是限制植物生长的土壤肥力障碍因子(图 2 和表 6)。上海外环绿带土壤容重和总孔隙度均值与张凯旋等^[22]的研究结果(土壤容重 1.41 g/cm³，总孔隙度 40.4%~49.4%)类似，但非毛管孔隙度明显小于其研究结果(1.91%~5.55%)，说明上海外环绿带土壤物理性质近年来呈恶化的趋势，这可能是游客人为踩踏导致^[23]。

上海外环绿带典型绿地土壤容重比伍海兵^[23]研究中心城区绿地土壤(1.31 g/cm³)高 0.11 g/cm³，总孔隙度和非毛管孔隙度比中心城区绿地土壤(45.4% 和 3.59%)分别低 1.80% 和 2.42%。这可能是与上海外环绿带建成时间短、土壤本底和养护水平差有关。中心城区公园绿地建成时间较长，如杨浦区的共青国家森林公园于 1986 年开园，黄浦区的复兴公园从 19 世纪 80 年代开建等。而上海环城林带始建于 1995 年，其中有将近一半的土地为建设用地，建设用地土

壤物理性质较差^[7]。上海外环绿带建设中，大量的黏重淤泥和生土用作绿化栽植土来源，回填时混入建筑垃圾，以及客土的直接填埋，这些都导致新建公园土壤物理性质较差^[24]。在养护方面，上海外环绿带多采用生态养护，土壤改良等养护措施投入较少，而公园绿地需要长时间良好的养护措施才能改善^[25]。因此，只有通过土壤改良等管理措施，改善土壤物理性质，才能满足上海外环绿带植物提升的需求。

3.2 通过施用有机无机改良材料提升上海外环绿带土壤质量

pH、有机质、碱解氮和有效磷等也是限制植物生长的土壤肥力障碍因子(图 2)。同时，土壤碱解氮、肥力质量也影响着土壤健康质量(表 6)。因此，需要全面提升土壤肥力质量。有机质与容重、pH 显著负相关，与碱解氮和有效磷显著正相关，这说明通过提升上海外环绿带土壤有机质可直接或间接提升土壤肥力质量。此外，消纳城市有机废物是新时期园林绿化建设面临的重要问题之一。湿垃圾是重要的城市有机废弃物，本身富含糖类、淀粉、脂肪和蛋白质等有机物及丰富的微量元素，经好氧发酵后可转化为稳定的腐殖酸和可利用的营养物质。施用湿垃圾堆肥产品不仅能增加土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量，降低土壤 pH，提升土壤肥力，还能提升团聚体稳定性，改良土壤结构，促进植物生长^[26-27]。因此，可通过施用湿垃圾沼渣堆肥提升环城林带土壤肥力质量。

虽然湿垃圾沼渣堆肥产品改善土壤肥力质量效

果较好,但可能提升非毛管孔隙效果较差,因此,需要将其与无机或矿质改良材料结合运用^[27]。添加黄沙虽能在一定程度上改善非毛管孔隙,但黄沙内部致密,增加非毛管孔隙效率较低。多孔的无机改良材料具有高孔隙度、高强度的特点,可以快速提升土壤非毛管孔隙^[28-29]。因此,可通过湿垃圾沼渣堆肥与多孔改良剂配用,提升上海外环绿带土壤质量。

3.3 加强上海外环绿带土壤质量监测与栽植土管理

长期的监测数据积累是客观、全面反映土壤实际情况和土壤质量演变规律的基础,也是科学指导上海外环绿带典型绿地绿化养护的重要依据和环境执法的有效证据^[30]。“上海典型绿地土壤质量监测保障体系”专项从2014年起已连续运行9年,积累了大量的土壤质量监测数据^[11, 31]。因此,可以通过该专项,开辟环城林带绿地土壤质量监测板块,构建上海外环绿带监测网络、指标体系和评价体系,研建环城林带专属土壤质量监测体系,定期发布土壤质量监测结果。

4 结论

上海外环绿带土壤肥力质量总体堪忧,土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、pH等土壤肥力质量特征指标主要分布在限制植物生长的四级、五级和六级;土壤环境质量总体清洁,全Cu、全Zn、全Pb、全Cd、全Cr、全Hg、全As和全Ni污染程度较轻,主要分布在一级;土壤健康质量不容乐观,土壤呼吸强度和酶活性较低。上海外环绿带需要通过土壤改良、施用有机无机改良材料等措施改善土壤基本理化性质、增加土壤有机质含量,提升土壤质量。

参考文献:

- [1] 李劲, 刘家明, 宋涛, 等. 城市绿带及其游憩利用研究进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1252–1261.
- [2] 汤西子, 邢忠. 融合城市边缘区半自然生境保护的环城绿带建设研究[J]. 风景园林, 2021, 28(2): 90–95.
- [3] 郑舒展, 姜卫兵, 魏家星. 我国环城绿带的发展: 问题、对策与展望[J]. 中国城市林业, 2017, 15(3): 11–15.
- [4] 李鹏, 齐实, 张林, 等. 北京山区不同植被恢复类型土壤质量综合评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 337–346, 356.
- [5] 段碧辉, 孙奥, 王芳, 等. 荆门市耕地不同利用方式土壤质量综合评价[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1371–1379.
- [6] 伍海兵, 梁晶, 蔡永立, 等. 人工湖沿岸带绿地土壤质量特征研究——以上海滴水湖沿岸带为例[J]. 中国园林, 2022, 38(2): 110–114.
- [7] 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.
- [8] 杨颖, 郭志英, 潘恺, 等. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 461–475.
- [9] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603–616.
- [10] 韩继刚, 李刚, 张维维, 等. 城市绿地土壤健康质量问题与对策[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 268–276.
- [11] 张维维, 韩继刚, 张琪, 等. 基于土壤微生物学指标的城市绿地土壤健康质量评价初探——以上海市为例[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 213–221.
- [12] Yi Y, Shen G R, Zhang C, et al. Quantitative analysis and prediction of urban heat island intensity on urban-rural gradient: A case study of Shanghai[J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154264.
- [13] 张万儒. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [14] 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.
- [15] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准: GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 土壤微生物生物量的测定 熏蒸提取法: GB/T 39228—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [17] Zhang W W, Liu W, He S W, et al. Mixed plantations of *Metasequoia glyptostroboides* and *Bischofia polycarpa* change soil fungal and archaeal communities and enhance soil phosphorus availability in Shanghai, China[J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(12): 7239–7249.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 饲料添加剂木聚糖酶活力的测定: GB/T 23874—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [19] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [20] 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, 2019.
- [21] 余慧敏, 李婕, 韩逸, 等. 基于重金属和有益微量元素评价南方典型丘陵区稻田土壤健康质量——以奉新县为例[J]. 土壤, 2020, 52(2): 394–403.
- [22] 张凯旋, 商侃侃, 达良俊. 上海环城林带不同植物群落土壤质量综合评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 71–77.
- [23] 伍海兵. 上海中心城区典型绿地土壤物理性质特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(1): 155–161.
- [24] 项建光, 方海兰, 杨意, 等. 上海典型新建绿地的土壤质量评价[J]. 土壤, 2004, 36(4): 424–429.
- [25] 黄俊达, 叶子易. 辰山植物园土壤改良修复关键技术实践[J]. 中国园林, 2017, 33(12): 123–128.
- [26] 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.
- [27] 伍海兵, 马想, 梁晶. 厨余垃圾沼渣堆肥与化学改良剂对城市搬迁地土壤团聚体形成的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 911–917.
- [28] 孙益权, 王美艳, 黄化刚, 等. 新型多孔改良剂增强黄壤通气性能研究[J]. 土壤, 2019, 51(1): 121–126.
- [29] Yu Q B, Wang M Y, Tian Y T, et al. Effects of porous clay ceramic rates on aeration porosity characteristics in a structurally degraded soil under greenhouse vegetable production[J]. Pedosphere, 2021, 31(4): 606–614.
- [30] 黄思华, 潘励杰, 解雪峰, 等. 面向数字土壤制图的土壤采样设计研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 259–272.
- [31] 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.