

上海辰山植物园绿化种植土壤修复效果研究

代琦¹, 叶子易¹, 蔡云鹏² (1. 上海市园林工程有限公司, 上海 200083; 2. 上海市辰山植物园, 上海 201619)

摘要 通过对上海辰山植物园土壤修复一期工程前后各区域土壤主要化学性状、养分及物理性质的调查, 探讨土壤修复对植物园土壤理化性质的影响, 以期为今后辰山植物园的土壤修复工程提供科学依据, 并为未来新建植物园和有效改良现有植物园提供科学借鉴。

关键词 土壤修复; 理化性质; 效果评价

中图分类号 S 156 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)03-0050-04

doi: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2019. 03. 017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Soil Restoration Effect of Green Planting in Shanghai Chenshan Botanical Garden

DAI Qi¹, YE Zi-yi¹, CAI Yun-peng² (1. Shanghai Garden Engineering Co., Ltd., Shanghai 200083; 2. Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201619)

Abstract The main chemical characters, nutrients and physical properties of soil in various areas before and after the first phase of soil restoration project of the Chenshan Botanical Garden in Shanghai were investigated, and the influence of soil restoration on soil physical and chemical properties of the botanical garden was discussed, in order to provide scientific basis for the soil restoration project of the Chenshan Botanical Garden in the future. It also provided scientific reference for the future construction of new botanical gardens and the effective improvement of existing botanical gardens.

Key words Soil restoration; Physical and chemical properties; Effect evaluation

2000年, BGC I发布的《植物园保护国际议程》明确要求, 植物园在植物多样性保护工作中的全球使命包括: “防止全世界植物物种及其遗传多样性的流失; 注重防止世界自然环境的进一步退化; 使公众认识到植物多样性的价值以及他们所面临的威胁; 以实际行动改善全球自然环境; 为了我们的子孙后代, 努力实现世界自然资源的可持续利用”。在此现状下, 植物园成为世界各国共同关注的机构和积极支持建设的重点, 许多新的植物园在世界各地不断兴起, 并成为当地植物种质资源的保护中心, 植物园的建设和发展也成为一个国家文明发展、科技进步的重要标志, 其功能和作用比以往任何时期都备受关注, 它不仅是人类面对生物多样性衰退和全球气候变化采取的一项应对措施, 更是人类通过科学手段构建的一个多样性的植物生存空间, 在如今全球生态系统受到严重威胁的环境下, 它体现了当代社会人类对待植物与自然的态度和方式, 彰显了人与自然之间和谐共存的关系与智慧。

上海辰山植物园是由上海市人民政府、中国科学院、国家林业局以及中国林业科学研究院于2005年合作共建, 占地面积207 hm², 是一座融科研、科普、景观和休憩为一体的国家级综合性植物园。自开园以来, 辰山植物园始终紧跟国家战略, 围绕地方需求, 充分利用现代生物技术, 合理挖掘资源潜力, 不断开发新资源、探索新技术、培育新品种; 充分利用现代信息技术, 深度挖掘社会需求, 不断开拓市场资源, 创新科普形式、提升文化内涵; 充分利用现代服务理念, 探索创新机制, 强化社会服务功能, 提升服务品质。

随着辰山植物园自身的发展和国际影响力的提升, 植物收集展示和保育研究的种类逐渐增多, 但由于辰山植物园绿

化种植土质较差, 板结现象严重, 及规划、建设时期的历史遗留原因, 土壤中砖头、石块等建筑垃圾较多, 机械碾压现象严重^[1], 不少区域内发生积水, 导致植物发根不好甚至死亡。为了能够给来自世界各地的植物提供一个良好的生长环境, 更好地发挥辰山植物园在全球生物多样性保护中的作用, 同时提升我国植物园事业在国际上的影响力, 进一步推动上海生态之城的建设步伐^[2], 在此背景下, 结合园区现状以及土壤初步研究结果, 拟对植物园相关区域绿化种植土壤进行有针对性地改良修复工作^[3]。为此, 辰山植物园已于2015年开始分区块对园区绿化种植土壤进行一期改良与修复工作, 并取得初步成效, 为全球植物多样性保护奠定基础。笔者通过对土壤修复一期工程前后各区域土壤主要化学性状、养分及物理性质的调查^[4], 探讨土壤修复对植物园土壤理化性质的影响, 以期为今后辰山植物园的土壤修复工程提供科学依据, 并为未来新建植物园和有效改良现有植物园提供科学借鉴。

1 采样与方法

1.1 概况 上海辰山植物园(图1)绿化种植土壤修复一期工程主要涉及南入口区、矿坑花园和岩石药用园及周边区、展览温室周边区共26.5 hm², 是辰山植物园内深受游客喜爱的重点游览区域, 包含平地、山体、温室建筑等多种类型, 全园80%的游客会集中在此。但自建园以来, 三区植物长势较差, 尤其是入口区的广玉兰数量逐年递减。2015年经专家评审, 开始实施上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复一期工程^[5]。

1.2 土样采集 项目组分别在土壤修复工程前后, 即2014年9月27—29日、2017年6月14—20日进行土样采集。共采样点数为60个, 样品79个, 符合《CJ/T 340—2016绿化种植土壤》验收规范的取样频率要求。样品分为表层样品及分层样品2类。表层样品定位采样点共设60个, 采样深度为0~30 cm, 代号为“A”, 每个采样点按连续“S”形采样法用土

作者简介 代琦(1979—), 女, 四川宜宾人, 高级工程师, 博士, 从事园林景观研究。

收稿日期 2018-07-11

钻采集 0~30 cm 土样,将多点土样混合成 1 个样品,共 60 个表层土样;除表层样品外,再用土钻采集 30~60 cm(代号为“B”)和 60~100 cm(代号为“C”)的分层样品,分别钻取 5~6

个剖面组成混合样品,其中,心土层(B层)采集 18 个土样,底土层(C层)采集 1 个土样,合计采集 19 个土壤样品,3 层总计 79 个土样^[6]。

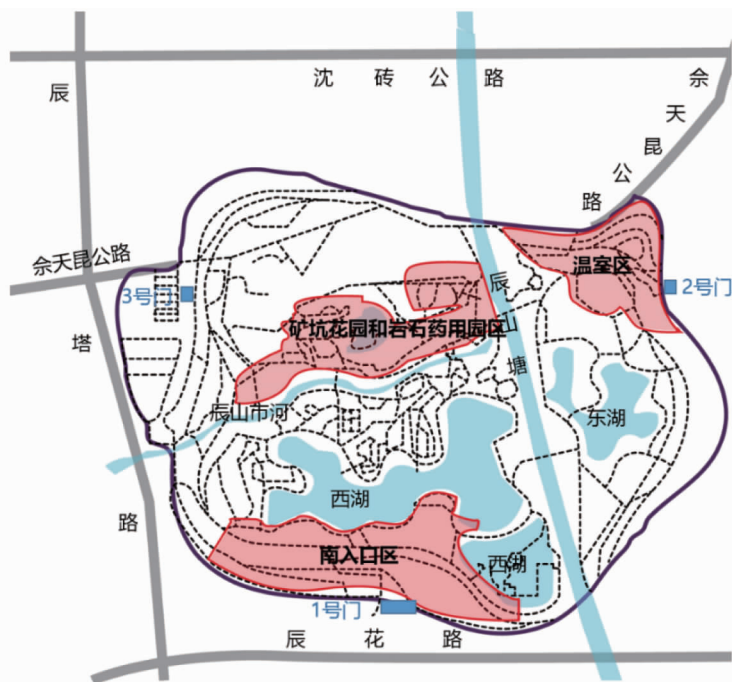


图 1 上海辰山植物园

Fig. 1 Shanghai Chenshan Botanical Garden

1.3 测定项目与方法 土壤修复工程前主要测定 pH、电导率(EC)、有机质(O.M)、土壤密度、土壤非毛管孔隙度等 5 项指标,测定方法按 CJ/T 340—2016^[7]规定的方法操作。随着土壤修复工程的不断深入,项目组发现,园区土壤现状比原设想更为恶劣,考虑到土壤入渗率和土壤质地指标对该次修复工程的重要性,故在修复工程后的测定项目中增设此两项内容。

1.4 数据处理 分析所用的药品和试剂均为 AR 级,试剂配制、样品稀释和蒸馏等一律用双重蒸馏水,以免引入离子导致误差;每个样品各测试项目均做 2 个平行值,以消除偶然误差。

在数据处理过程中,用 Excel 对测试所得的原始数据进行统计分析,应用模糊数学方法确定土壤质量单因子评价的隶属度、权重,建立隶属函数和综合评价模型,确立上海辰山植物园土壤修复一期工程土壤质量等级。

2 结果与分析

2.1 土壤主要化学性状变化

2.1.1 pH 整体降低。土壤 pH 的大小,对植物及生活于土壤中的有益微生物有很大的影响,而不同的植物对土壤 pH 的反应是不同的,对多数植物来讲,适宜的土壤环境,一般是中性到微酸性和微碱性。土壤 pH 是影响土壤肥力的重要因素之一,它与土壤养分的存在性及有效性有密切关系。因此,土壤酸碱度是土壤化学性质的综合表现。根据测试结果,上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复工程(一期)土壤改良修复后的 pH 整体降低。68.80%为 pH>7.5~8.0 的弱碱性土壤,pH>8.0~8.3 的碱性土壤占 22.80%,最适宜

大多数植物生长的中性土壤 pH 6.5~7.5 占 13.90%,无强碱性土壤。按国家住房和城乡建设部颁布的城镇建设行业标准《绿化种植土壤 CJ/T 340—2016》规定土壤 pH≤8.3 为合格,则上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复工程(一期)土壤的合格率为 100%。改良修复后 3 个区域的土壤 pH 的合格率提高,平均值分别降低 5.54%~8.79%,其中矿坑花园及周边的降低效果最好。

2.1.2 土壤 EC 值在正常值范围内。据测试结果,土壤 EC 主要分布在 2 个区间,其中,土壤 EC 在 0.15~0.30 mS/cm 较适宜范围的为 64.60%,无土壤 EC 在 0.05~0.15 mS/cm 较低范围内,说明改良修复后土壤的可溶性养分离子明显增加,有利于植物对养分的吸收;土壤 EC 在 0.3~0.9 mS/cm 稍高范围的为 35.4%,无 EC>0.9 mS/cm 的土壤,表明土壤无明显的盐分积累。按国家住房和城乡建设部颁布的城镇建设行业标准《绿化种植土壤 CJ/T 340—2016》规定土壤 EC 值 0.15~0.90 mS/cm 为合格,则上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复工程(一期)土壤的整体合格率为 100%,总体而言,土壤的可溶性离子在正常值范围内。改良修复前土壤 EC 的平均值均低于合格值的下限,改良修复后平均值分别提高了 82.2%~146.6%,但均能控制在适宜的范围内,一般不会导致次生盐渍化,其中矿坑花园及周边提高的幅度最大。

2.2 土壤主要养分变化 土壤有机质是土壤中各种营养元素特别是氮、磷的重要来源。它还含有刺激植物生长的胡敏酸类等物质。由于它具有胶体特性,能吸附较多的阳离子,因而使土壤具有保肥力和缓冲性。它还能使土壤疏松和形

成结构,从而改善土壤的物理性质。它也是土壤微生物必不可少的碳源和能源。因此,除低洼地土壤外,一般来说,土壤有机质含量是土壤肥力高低的重要指标。通过改良修复,上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复工程(一期)区域土壤的有机质含量大幅度地提高,很肥沃的土壤占优势,达45.60%;肥沃的土壤达24.10%;较肥沃的为21.50%。按国家住房和城乡建设部颁布的城镇建设行业标准《绿化种植土壤CJ/T 340—2016》规定植物园的土壤有机质 $\geq 20 \sim 80$ g/kg为合格,则上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复工程(一期)土壤的合格率为100%,土壤有机质含量 >20 g/kg高达91.10%。这保证了上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复工程(一期)的大多数植物正常生长,有利于土壤理化性质的改善。改良修复前土壤有机质的平均值均在一般的区间内,改良修复后不同区域的土壤有机质平均值分别提高197.0%~291.9%,平均值均属于很肥沃的水平,其中温室及周边提高的幅度最大。

2.3 土壤主要物理性质变化

2.3.1 土壤密度合格。土壤密度会影响土壤中各元素、空气、水以及温度等,从而影响植物的生长发育。对于同一质地的土壤,土壤密度过大,会直接影响植物根系的生长;密度小,说明土壤疏松,非常适宜种植一些草本和小灌木,但太低

的密度不利于固定高大植物,因此土壤密度并非越低越好。通过改良修复,在土壤密度 $1.20 \sim 1.35$ mg/m^3 的适宜范围内土壤占绝对优势,高达84.80%;土壤密度 <0.75 mg/m^3 占比仅为3.80%。按国家住房和城乡建设部颁布的城镇建设行业标准《绿化种植土壤CJ/T 340—2016》密度 <1.35 mg/m^3 为合格,则整体合格率为100%。改良修复前土壤密度的平均值均在很紧实的区间内,改良修复后不同区域的土壤密度平均值分别降低了14.4%~29.0%,平均值均属于适宜的范围,其中矿坑花园及周边改善的效果最大。

2.3.2 土壤非毛管孔隙度平均值增大。毛管水不能占据的大孔隙被称为通气孔隙,也被称为非毛管孔隙。蓄水能力低下和营养物质匮乏。通气孔隙度直接关系到植物根系的呼吸和生长,直接关系到园林植物的成活率,是评价园林绿化土壤质量的重要指标。通过改良修复前后对比,改良修复前各区域土壤非毛管孔隙度的平均值均不合格且极低,改良修复后不同区域的土壤非毛管孔隙度平均值分别增大275.00%~341.18%(表1),平均值均属于合格以上,其中温室及周边改善的效果最明显。

2.3.3 土壤质地获得明显改善。上海辰山植物园所在地区土壤质地偏黏,通过改良修复,最适宜园林植物生长的砂壤土和壤土高达87.3%,改良修复效果十分明显。按国家住房

表1 上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复一期工程改造前后指标对比^[8]

Table 1 Indexes of underground part of green-planting in Shanghai Chenshan Botanical Garden before and after the first phase of soil restoration project

采样区域 Sampling area	统计分析 Statistical analysis	pH(2.5:1)		EC//mS/cm		OM//g/kg		土壤密度 Soil Density//mg/m ³	
	合格阈值 Qualified threshold	5.5~8.3		0.15~0.9		12~80		<1.35	
	类型 Type	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration
南入口及周边 South entrance and surrounding regions	合格数//个	7	48	7	48	11	48	0	48
	合格率//%	41.18	100.00	41.18	100.00	64.71	100.00	0.00	100.00
	样本数//个	17	48	17	48	17	48	17	48
	平均值	8.36	7.89	0.146	0.290	13.72	40.75	1.53	1.31
	中值	8.37	7.88	0.130	0.239	13.56	37.11	1.52	1.32
	方差	0.03	0.04	0.002	0.022	32.05	238.03	0.01	0.00
	最小值	7.86	7.45	0.098	0.152	5.14	17.01	1.37	1.20
	最大值	8.69	8.28	0.230	0.808	31.35	78.80	1.67	1.34
	标准偏差	0.18	0.21	0.042	0.149	5.66	15.43	0.08	0.03
	变异系数	2.18	2.6	29.066	51.307	41.26	37.86	5.00	2.50
矿坑花园及周边 Pit garden and surrounding regions	合格数//个	7	21	5	21	11	21	0	21
	合格率//%	38.89	100.00	27.78	100.00	61.11	100.00	0.00	100.00
	样本数//个	18	21	18	21	18	21	18	21
	平均值	8.32	7.58	0.129	0.317	14.15	42.65	1.57	1.12
	中值	8.36	7.61	0.110	0.212	13.00	35.03	1.60	1.23
	方差	0.07	0.06	0.002	0.043	22.18	579.72	0.01	0.08
	最小值	7.75	7.20	0.072	0.151	7.14	13.30	1.42	0.35
	最大值	8.69	8.20	0.230	0.824	21.78	77.93	1.68	1.34
	标准偏差	0.27	0.25	0.048	0.207	4.71	24.08	0.07	0.28
	变异系数	3.21	3.35	37.188	65.305	33.29	56.46	4.71	25.07
温室区及周边 Greenhouse and surrounding regions	合格数//个	6	10	8	10	13	10	0	10
	合格率//%	33.33	100.00	44.44	100.00	72.22	100.00	0.00	100.00
	样本数//个	18	10	18	10	18	10	18	10
	平均值	8.32	7.8	0.143	0.260	14.20	55.66	1.60	1.14
	中值	8.35	7.78	0.130	0.259	13.26	54.94	1.62	1.24
	方差	0.02	0.03	0.002	0.013	19.39	319.35	0.01	0.04
	最小值	7.98	7.45	0.064	0.153	7.14	17.49	1.36	0.76
	最大值	8.51	8.07	0.230	0.543	23.14	76.14	1.76	1.34
	标准偏差	0.14	0.19	0.045	0.115	4.40	17.87	0.09	0.21
	变异系数	1.65	2.39	31.71	44.134	31.00	32.10	5.60	18.31

接下表

续表 1

采样区域 Sampling area	统计分析 Statistical analysis	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity//%		入渗率 Infiltration rate//mm/h		质地/名称 Texture/name		质量等级/百分制 Quality grade/Centesimal grade	
	合格阈值 Qualified threshold	5~25		≥5		壤质土 Loam soil		≥60	
	类型 Type	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration	改造前 Before soil restoration	改造后 After soil restoration
南入口及周边 South entrance and surrounding regions	合格数//个	1	48		48		48	1	45
	合格率//%	5.88	100.00		100.00		100.00	5.88	93.75
	样本数//个	17	48		48		48	17	48
	平均值	2.0	7.50		21.9			36.99	69.49
	中值	1.8	7.6		11.1			34.50	70.90
	方差	1.5	2.0		721.4			99.71	35.09
	最小值	1.3	5.4		5.8			24.87	51.35
	最大值	6.8	12.4		139.1			69.65	84.13
	标准偏差	1.2	1.4		26.9			9.99	5.92
	变异系数	61.5	19.2		122.5			26.99	8.52
矿坑花园及周边 Pit garden and surrounding regions	合格数//个	0	21		21		21	1	21
	合格率//%	0.00	100.00		100.00		100.00	5.56	95.24
	样本数//个	18	21		21		21	18	21
	平均值	2.1	8.8		48.6			35.85	72.85
	中值	2	8.0		28.7			33.76	71.83
	方差	0.7	10.1		2076.7			89.96	53.82
	最小值	0.8	5.2		5.9			20.07	59.28
	最大值	3.9	16.5		141.4			62.74	85.08
	标准偏差	0.8	3.2		45.6			9.48	7.34
	变异系数	38.5	36.1		93.8			26.46	10.07
温室区及周边 Greenhouse and surrounding regions	合格数//个	0	10		10		10	0	9
	合格率//%	0.00	100.00		100.00		100.00	0.00	90.00
	样本数//个	18	10		10		10	18	10
	平均值	1.7	7.5		30.7			36.56	73.32
	中值	1.8	6.7		24.7			35.79	76.70
	方差	0.3	3.8		605.0			41.21	85.75
	最小值	0.8	5.6		6.2			27.4	50.33
	最大值	3.0	11.7		78.6			46.55	82.79
	标准偏差	0.5	1.9		24.6			6.42	9.26
	变异系数	30.1	25.7		80.1			17.56	12.63

和城乡建设部颁布的城镇建设行业标准《CJ/T 340—2016 绿化种植土壤》规定土壤质地壤土类、黏壤土类为合格,则整体合格率达 100%。温室及周边的土壤质地改善最为明显,其次是南入口及周边,经过改良矿坑花园及周边虽然均合格,但有 33.30% 的土壤稍偏黏。

2.3.4 土壤入渗率得到有效提高。土壤入渗率是土壤质量的重要评价指标之一,一般用饱和导水率来表示,其好坏直接关系到地表径流量大小和对土壤水分的补给强弱,也是评价土壤水分调节能力的重要指标之一。经过改良修复,无土壤入渗率在 5 mm/h 以下的极差土壤,在 100~360 mm/h 的土壤入渗率优的土壤仅有 6.3%。入渗率良好的土壤占 24.1%。按国家住房和城乡建设部颁布的城镇建设行业标准《CJ/T340—2016 绿化种植土壤》规定土壤入渗率 ≥ 5 mm/h 为合格,则整体合格。该项目的 3 个改良修复区域中,矿坑花园及周边的土壤入渗率提高幅度最大,有 19% 的土壤达到优的水平,其次是温室及周边土壤,有 40% 的土壤达良好的水平。

2.4 土壤综合质量变化 用 Excel 对测试所得的原始数据进行统计分析,将测定各项目作为土壤质量评价的单因子,应用层次分析法划分各测定指标的权重,用模糊数学方法确定土壤质量单因子评价的隶属度,确立上海辰山植物园土壤

质量等级,将综合评价指数 0.8~1.0、0.6~0.8、0.4~0.6、0.2~0.4、≤0.2 分别定为 1、2、3、4、5 类土壤,该项目 5 类土壤均有分布。整体而言,改良修复前土壤质量等级主要为 4 类土,而改良修复后,土壤质量等级明显提升,以 2 类土为主,而且出现质量最好的 1 类土(10.10%)。该项目的 3 个区域中,改良修复前各区域土壤均以 4 类土为主,改良修复后不同区域的土壤质量均上升为 2 类土为主,分别提升 87.90%~103.20%,平均值均属于合格以上,其中提升幅度最大的是矿坑花园及周边的土壤。

3 结论

从土壤修复前后的检测指标看,通过改良修复,土壤 pH 整体降低;土壤的 EC 明显增加;有机质含量大幅提高;土壤密度合格;土壤非毛管孔隙度平均值增大。修复后的土壤质地获得明显改善,土壤入渗率整体合格,土壤质量等级获得较大幅度改善,其中提升幅度最大的是矿坑花园及周边的土壤。其原因是建园后该区域为辰山植物园的特色景观区域,全年布置花境,深受广大游客喜爱,园区自身养护、投入较大,且因地形条件多以人工操作为主,不需要机械压实,利于植物生长。

综上所述,上海辰山植物园土壤非毛管孔隙度小、土壤

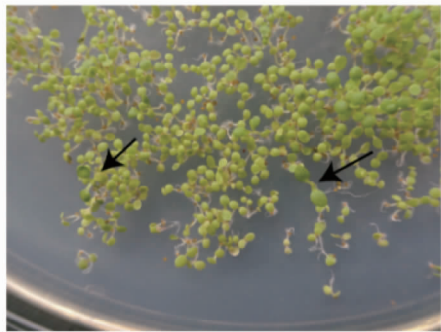


图5 阳性植株抗性筛选

Fig. 5 Screening for resistance of positive plants

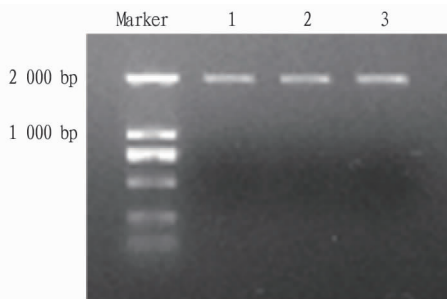


图6 阳性植株 PCR 验证

Fig. 6 PCR validation of positive plants

理镉污染最有效的方法。

该试验自拟南芥种子资源中心获得 *CTSP3* 基因功能缺失突变体^[8-10],前期研究结果显示 *CTSP3* 基因参与了植物对镉胁迫的响应,因此通过基因工程技术构建 *CTSP3*-GUS 重组载体^[11-12],将其转入野生型拟南芥中,从而获得转基因植株。这为研究 *CTSP3* 基因在植物中的表达模式和镉耐受调节机制中的作用提供了依据,是一个非常关键的课题。

(上接第53页)

密度大、入渗率低等是造成植物长势不良的主要障碍因子。为建设世界一流植物园,辰山园区必须对土壤进行大规模修复与治理,保障植物健康生长。上海辰山植物园通过一期的工程实践,取得了较好的效果,通过土壤修复措施不断增强植物园土壤对外界环境胁迫的抵抗力(resistance)和恢复力(resilience)^[4],构建以土壤修复为主的自我演替、循环发展的生态系统。有效的土壤改良不仅是解决植物园现状问题的最好途径,也是推动其可持续发展的重要原动力,这客观验证了土壤修复工程是有效的、可行的,对提升辰山植物园区土壤质量及植物的生长发育会产生良好的效果。

上海辰山植物园绿化种植土壤修复工程有利于实现将辰山植物园建设成世界一流植物园的发展目标,不仅能够提升我国在植物多样性保护及资源植物的利用与研究领域的

参考文献

- [1] SHIM D, HWANG J U, LEE J, et al. Orthologs of the class A4 heat shock transcription factor HsfA4a confer cadmium tolerance in wheat and rice [J]. *Plant cell*, 2009, 21: 4031-4043.
- [2] TAMÁS L, MISTRÍK I, ALEMAYEHU I A. Low Cd concentration-activated morphogenic defence responses are inhibited by high Cd concentration-induced toxic superoxide generation in barley root tip [J]. *Planta*, 2014, 239 (5): 1003-1013.
- [3] CHEN F, WANG F, WU F B, et al. Modulation of exogenous glutathione in antioxidant defense system against Cd stress in the two barley genotypes differing in Cd tolerance [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2014, 48 (8): 663-672.
- [4] STRAIF K, BENBRAHIM-TALLAA L, BAAN R, et al. A review of human carcinogens-Part C: Metal, arsenic, dusts, and fibres [J]. *Lancet Oncol*, 2009, 10 (5): 453-454.
- [5] KÜHNLENZ T, SCHMIDT H, URAGUCHI S, et al. *Arabidopsis thaliana* phytochelatin synthase 2 is constitutively active *in vivo* and can rescue the growth defect of the *PCS1*-deficient *cad1-3* mutant on Cd-contaminated soil [J]. *J Exp Bot*, 2014, 65 (15): 4241-4253.
- [6] HALL J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance [J]. *J Exp Bot*, 2002, 53: 1-11.
- [7] CLEMENS S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis [J]. *Planta*, 2001, 212 (4): 475-486.
- [8] BELHAJ K, CHAPARRO-GARCIA A, KAMOUN S, et al. Plant genome editing made easy: Targeted mutagenesis in model and crop plants using the CRISPR/Cas system [J]. *Plant methods*, 2013, 9 (1): 1-10.
- [9] SIEMIANOWSKI O, BARABASZ A, KENDZIOREK M, et al. *HMA4* expression in tobacco reduces Cd accumulation due to the induction of the apoplastic barrier [J]. *J Exp Bot*, 2014, 65 (4): 1125-1139.
- [10] YAO J, KONG Q N, ZHU H Y, et al. Content and fractionation of Cu, Zn and Cd in size fractionated municipal solid waste incineration bottom ash [J]. *Ecotox Environ Safe*, 2013, 94: 131-137.
- [11] ZIENTARA K, WAWRZYNSKA A, ŁUKOMSKA J, et al. Activity of the *AtMRP3* promoter in transgenic *Arabidopsis thaliana* and *Nicotiana tabacum* plants is increased by cadmium, nickel, arsenic, cobalt and lead but not by zinc and iron [J]. *J Biotechnol*, 2009, 139 (3): 258-263.
- [12] ZHAI Z Y, GAYOMBA S R, JUNG H I, et al. OPT3 is a phloem-specific iron transporter that is essential for systemic iron signaling and redistribution of iron and cadmium in *Arabidopsis* [J]. *Plant cell*, 2014, 26: 2249-2264.

综合实力,加快上海建设全球卓越城市的步伐。同时,也为城市绿化建设过程中土壤修复提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 陈智坤, 从晓峰, 马延康, 等. 机械碾压对新建城市绿地土壤理化性质的影响: 以西安植物园新园区为例 [J]. *中国农学通报*, 2016, 32 (26): 109-113.
- [2] 伍海兵, 方海兰, 彭红玲, 等. 典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26 (6): 85-90.
- [3] 胡永红. 植物园建设的几个要点 [J]. *中国园林*, 2014 (11): 88-91.
- [4] 谢维垣. 华南植物园土壤肥力特征及其利用改良研究 [J]. *土壤学报*, 1986 (1): 89-92.
- [5] 上海市园林工程有限公司. 上海市辰山植物园绿化种植地下部分改良修复一期工程可行性研究报告 [R]. 2015.
- [6] 上海惠浦工程检测有限公司. 上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复一期工程园林绿化土壤检测报告 [R]. 2017.
- [7] 上海市园林科学规划研究院. 绿化种植土壤: CJ/T 340—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [8] 上海辰山植物园. 上海辰山植物园绿化种植地下部分改良修复一期工程项目后评估报告 [R]. 2017.