

山东省烟台市填海造陆居住区绿地土壤质量 现状调查与评价

段晓阳 杨晓婷 韩 露 王顺利* 石生伟*

(北京农学院资源与环境学院, 北京 102206)

摘 要: 以山东省烟台市填海造陆居住区绿地土壤为研究对象, 选取9个具有当地典型园林植物群落结构特征的样地, 开展土壤4项物理属性和9项化学属性的测定, 并运用修正内梅罗指数法进行土壤质量评价。指标测定结果显示: 填海造陆居住区绿地表层(0~15 cm)土壤的通气孔隙度和容重分别为6.60%和1.56 g/cm³, 处于五级和六级水平; 表层和亚表层(15~30 cm)土壤有机质含量分别为14.74 g/kg和9.24 g/kg, 处于四级和五级水平; 全氮和土壤碱解氮含量均值分别为0.58 g/kg和16.66 mg/kg, 处于五级和六级水平; 表明土壤养分整体处于贫瘠状态。剖面测定结果显示: 土壤属性与深度无一致性变化规律; 绿地表层和亚表层的内梅罗综合指数均值为0.80和0.76, 表明土壤质量很差, 存在通气不良、土体紧实和有机质缺乏的问题, 不利于城市园林植物的生长。

关键词: 居住区绿地; 土壤质量; 限制性因素; 改良; 烟台市

中图分类号: S731.5 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2025)01-0087-10

Investigation and evaluation of soil quality in green space in sea reclamation residential areas of Yantai City, Shandong Province

DUAN Xiaoyang YANG Xiaoting HAN Lu WANG Shunli* SHI Shengwei*

(College of Resources and Environment, Beijing Agricultural College, Beijing 102206, China)

Abstract: This study focused on the soils for residential green spaces from reclaimed land in Yantai City. The soil properties including 4 soil physical index and 9 chemical indexes were measured from 9 plots which were identified with the typical structural characteristics of local garden plant communities. The modified Nemerow index method was applied for the comprehensive evaluation of soil quality. The results showed that the soil aeration porosity and bulk density of the surface layer (0–15 cm) of the green space in the residential area were 6.60% and 1.56 g/cm³, which were at the fifth and sixth levels, respectively; and the mean value of soil organic matter, a proxy of soil fertility, was 14.74 g/kg, which was at the fourth levels. Meanwhile, the mean values of total nitrogen content and soil alkali-hydrolyzable nitrogen were 0.58 g/kg and 16.66 mg/kg, which were at the fifth and sixth levels. These evidences indicated the soil fertility in the surveyed area was poor. In addition, the results of profile measurements showed no consistent pattern of change in soil properties with increasing depth. The averages of the modified Nemerow index in the surface and sub-surface layers of the green space were 0.80 and 0.76, respectively, indicating that the soil quality was very low, with the problems of poor aeration, compaction, and the lack of soil organic matter, which were not conducive to the growth of urban garden plants.

Key words: residential green space; soil quality; limiting factors; improvement; Yantai City

改革开放以来, 我国城市化进程加快, 城市人口迅速增加, 对土地的需求日益增长, 尤其在经济发达地区更为强烈。在土地资源较为紧缺的东部沿海地区, 填海造陆是增加城市建设和工业生产用地的有效手段之一(王萌, 2015)。中国沿海地区开展的较

大规模的填海造陆活动有效扩展了住宅社区和商业用地(Shi et al., 2002)。随着经济水平和居民收入的增长, 居民对居住区绿地质量有了更高的要求。城市绿地土壤是维系城市生态系统稳定和植物健康生长的重要基础和媒介。如果绿地土壤质量不达标, 将

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-08-28。

基金项目: 万科公益基金会资助项目。

*通信作者: 王顺利(E-mail: wangshunli80@163.com), 副教授。

石生伟(E-mail: weiweishi848@gmail.com), 副教授。

严重制约园林植物的健康生长和绿化景观生态功能的发挥(韩继刚等, 2022)。填海造陆区通常采用吹填海底泥沙后人工铺砂并表层覆土压实, 以防止海水入侵后盐分通过毛细作用上升到表层土壤引起盐渍化(郑垒等, 2013)。由于填海造陆的客土大多为养分不足的砂质生土, 土壤缺乏自然成土的生物演替过程而难以具备良好的水、肥、气、热等功能(毛建华, 2010; 许翼等, 2017)。此外, 填海造陆土壤盐渍化、板结化、肥力不足等问题逐渐加剧, 成为城市绿地质量提升的最大障碍(马文梅, 2011; Jiang et al., 2016)。

通过对绿地土壤质量进行调查与评价, 准确找到土壤障碍因素, 可为编制城市园林植物土壤改良方案提供科学依据。目前, 中国多数城市已经开展了绿地土壤质量调查研究。项建光等(2004)对上海市部分新建景观绿地进行土壤现状调查, 并根据土壤pH值、EC值、有机质、容重等6个土壤特征指标评价土壤质量; 袁峰均等(2024)通过对深圳市填海区绿地展开实地调查, 发现绝大多数被调查土壤的有机质和氮素处于极贫乏状态; 黄丽丹等(2021)采用内梅罗指数法对南宁市新建绿地土壤肥力状况进行评价, 发现该地区绿地土壤肥力处于中上水平。相较于常规的城市绿地土壤质量的调查研究而言, 针对填海造陆后绿地土壤质量评价和演变规律的相关研

究很少。这在一定程度上限制了对填海造陆区土壤质量演变规律的认识和改良方案的编制。

本研究以烟台市典型填海造陆居住区绿地土壤为研究对象, 开展土壤物理和化学属性的全面调查, 通过土壤单因子指标的等级分级和修正内梅罗指数评价, 明确土壤障碍因素, 为绿地土壤改良和修复提供科学依据, 进而推动填海造陆居住区绿地生态系统健康和可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况和采样地点

选择山东省烟台市芝罘区填海造陆后形成的成熟居住区绿地为研究对象。该填海造陆区开发建设于2010年, 覆盖面积约90 hm², 其中大部分面积为建筑、道路和公共设用地。该地区年均气温12.1~12.5℃, 年均降水量600~650 mm, 年日照时数2750~2850 h, 属于温带半湿润大陆性季风气候。当地原生土壤属于第四系洪坡积物母质发育的棕壤(黎武标等, 2019),

绿地土壤采用围海吹填造地后人工铺砂和表层覆土方式形成, 并采用常规的园林养护管理。以施用化肥为主, 年均施氮肥量约300 kg/hm², 基本不施用有机肥。选取9个具有当地典型园林植物群落结构特征的样地(S1—S9)(表1)。每个样地中选定3个

表1 采样区基本情况

Tab. 1 Information on sampling sites

样地编号 Sample number	经纬度 Longitude and latitude	海拔/m Altitude	园林植物群落结构 Structure of landscape plant communities	绿化植物生长情况 Growth condition of green plants
S1	N 37°35'50", E 121°21'53"	5	银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 人工林, 林下为早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	银杏树长势不佳, 树叶发黄, 林下草坪退化
S2	N 37°35'51", E 121°21'45"	5	种植山楂树 <i>Crataegus pinnatifida</i> 和无花果 <i>Ficus carica</i> , 林下为早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	山楂树死亡率高, 无花果生长良好
S3	N 37°35'49", E 121°21'38"	0	林灌草复合绿化植被, 乔木为海棠树 <i>Malus spp.</i> , 灌木为冬青卫矛 <i>Euonymus fortunei</i> , 林下为早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	海棠长势不佳, 草坪有秃斑
S4	N 37°35'41", E 121°21'47"	6	种植山楂树 <i>Crataegus pinnatifida</i> , 林下为早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	山楂树叶缘枯黄, 果实座果率低
S5	N 37°35'35", E 121°21'56"	13.5	早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	大面积草坪枯死, 严重退化
S6	N 37°35'34", E 121°21'51"	11.1	早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪, 大叶杨 <i>Populus lasiocarpa</i>	草坪中度退化, 长势一般
S7	N 37°35'32", E 121°21'53"	11.8	早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪, 悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	其间有大量施肥措施, 草坪长势良好, 悬铃木长势不好
S8	N 37°35'31", E 121°21'54"	1	早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪, 悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	踩踏后严重板结, 草坪退化
S9	N 37°35'31", E 121°21'55"	11.8	早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	草坪长势一般
P1	N 37°35'29", E 121°21'58"	8	早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	草坪长势一般
P2	N 37°35'55", E 121°21'39"	7.8	旱柳 <i>Salix matsudana</i> 人工林, 林下为早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 草坪	旱柳长势一般, 未描述草坪

10 m × 10 m 的样方, 每个样方中按照“S”形分别采集5个表层(0~15 cm)和亚表层(15~30 cm)土层样品, 按照土壤层次各自混合为1个土样, 即每个样地获得3个表层和亚表层待测土样。采样时间为2021年8月上旬。

土壤样品风干过筛后, 参照《土壤农业化学分析方法》测定主要理化性质指标, 即容重、孔隙度、土壤pH值、电导率(EC值)、有机质、全氮(N)、全磷(P)、全钾(K)、碱解氮(N)、有效磷(P)、速效钾(K)等(表2)。另外, 采用环刀法采集表层(0~15 cm)原

表2 土壤理化性质测定方法

Tab. 2 Methods for determining the physico-chemical properties of soils

指标 Indicator	方法 Method
容重、孔隙度 Bulk density, porosity	环刀法
pH值 pH Value	电位法(水土比2.5:1)
电导率 Electrical conductivity	电位法(水土比5:1)
有机质 Organic matter	重铬酸钾氧化-外加热法
全磷 Total phosphorus	碱融-钼锑抗分光光度法
全氮 Total nitrogen	凯氏蒸馏法
碱解氮 Alkaline nitrogen	碱解-扩散法
全钾 Total potassium	氢氟酸-高氯酸熔融-火焰光度计法
速效钾 Available potassium	火焰光度计法
有效磷 Available phosphorus	钼锑抗比色法

状土土壤样品, 按照《森林土壤物理性质的测定方法(LY-T 1215-1999)》观测容重和孔隙特征, 每个样地重复3次。

为了研究土壤理化性质随着深度的变化特征, 分别选取社区草坪和乔木人工林样地各1个(P1和P2)作为剖面观测点(表1)。调查剖面按照0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm深度自下而上采集土壤, 每层取3个土样。测定指标同上表层土壤, 其中全磷、全钾、有效磷、速效钾仅测定0~60 cm内土壤样品。

1.2 绿地土壤质量评价方法

1.2.1 土壤单因子质量评价方法与标准

参照全国第二次土壤普查土壤肥力分级(1979)和有关绿化土壤标准(DB31/T 1191-2019《绿化土壤肥力质量综合评价方法》), 对绿地土壤养分指标和理化性质的单项指标划分为六级(表3)。为消除各单项指标之间量纲的差别, 便于不同绿地土壤肥力特征和限制因子的综合指标计算, 按照《绿化土壤肥力质量综合评价方法》推荐的方法进行标准化, 计算指标*i*的单项质量指数(P_i), 具体步骤参考单奇华等(2009)、周伟等(2018)方法完成。标准化后的单项土壤质量指数分值分布于0~3之间, 有利于不同地点的对比分析。

1.2.2 土壤综合质量评价方法

参考熊健等(2024)研究, 采用改进内梅罗指数法对不同绿地土壤2项土壤物理指标(通气孔隙度和容重)和7项化学指标(pH值、全氮、碱解氮、速效钾、有效磷、EC值和土壤有机质)进行评价。该方法可

表3 土壤指标分级标准

Tab. 3 Grading Standards for soil indicators

分级 Grade	pH值 pH value	EC值/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) EC value	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Organic matter	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total nitrogen	碱解氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Alkaline nitrogen	有效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available phosphorus	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available potassium	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total phosphorus	全钾/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total potassium	通气孔 隙度/% Aeration porosity	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Bulk density
一级 Level 1	6.5~7.5	300~500	≥40	≥2	≥200	≥60	≥300	≥1.0	≥25	≥15	1.00~1.15
二级 Level 2	5.5~6.5	100~300	30~40	1.5~2.0	120~200	20~60	200~300	0.8~1.0	20~25	12.5~15	1.15~1.25
三级 Level 3	7.5~8.0	500~700	20~30	1.0~1.5	90~120	15~20	100~200	0.6~0.8	15~20	10~12.5	1.25~1.35
四级 Level 4	8.0~8.5或 4.5~5.5	700~900	12~20	0.75~1.0	60~90	10~15	60~100	0.4~0.6	10~15	7.5~10	1.35~1.45
五级 Level 5	8.5~9.0	900~1200	6~12	0.5~0.75	40~60	5~10	30~60	0.2~0.4	5~10	5~7.5	1.45~1.55
六级 Level 6	≥9.0或 <4.5	>1200	<6	<0.50	<40	<5	<30	<0.2	<5	<5	>1.55

注: 通气孔隙度的分级标准依据10个城市居住区绿地观测数据(内部资料)。

Notes: The grading standard for aeration porosity is based on observational data from green spaces according to the investigated residential results from 10 cities (internal data).

以兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量指数。计算公式如下:

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

式中: P 为改进的土壤质量内梅罗综合指数; \bar{P}_i 为样品中单项土壤质量参数标准化的平均值; $P_{i\min}$ 为单项参数标准化的最小值; n 为参数个数。

采用改进的内梅罗综合指数评价土壤质量, 分级标准为: 当 $P > 2.7$, 说明土壤质量处于优质状态, 不存在限制因素; 当 $1.8 \leq P < 2.7$, 说明土壤质量处于良好状态, 基本不限制植物生长; 当 $0.9 \leq P < 1.8$, 说明土壤质量一般, 存在个别单项指标对植物生长的限制; 当 $P < 0.9$, 说明土壤质量很差, 大部分土壤质量指标不符合要求, 土壤肥力贫瘠, 极大限制植物生长。

1.3 数据处理

测定数据均采用 Excel 2019 整理, 采用 SPSS 26 软件进行数据方差分析并检验不同样地间差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质参数

2.1.1 土壤物理指标

土壤物理指标测定结果显示(表4), 土壤通气孔隙度为 4.62%~10.39% (均值 6.60%), 变异系数为 38.37%, 处于五级水平; 毛管孔隙度为 29.92%~38.83% (均值 34.31%), 变异系数为 11.77%; 总孔隙度为 37.00%~49.23% (均值 40.92%), 变异系数为 13.28%; 土壤容重为 1.41~1.65 g/cm³ (均值 1.56 g/cm³), 变异系数为 8.62%, 处于六级水平。调查区内土壤持水孔隙度、总孔隙

度和容重的变异系数 < 15%, 表明土壤普遍存在严重压实和通气不良问题。

表层土壤测定结果显示(表5), 土壤 pH 值为 7.93~8.46 (均值 8.15), 处于四级水平, 变异系数为 3.24%, 说明调查区内土壤酸碱性较为稳定且空间分布均匀; 土壤 EC 值为 185.53~346.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (平均值 259.20 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 处于二级水平, 变异系数为 26.76%, 属于中等强度变异, 反映了土壤的电导率空间分布不均匀, 但不存在盐渍化危害; 土壤有机质含量为 6.53~22.13 g/kg (平均值 14.74 g/kg), 处于四级水平, 变异系数为 42.45%, 属于高强度变异, 表明调查区土壤有机质含量偏低且空间分布不均匀; 土壤全氮含量为 0.43~0.77 g/kg (均值 0.58 g/kg), 处于五级水平, 不同绿地类型间不存在显著性差异; 土壤碱解氮含量均值为 16.66 mg/kg, 处于六级水平, 属于极度贫乏状态; 碱解氮和全氮含量极低, 说明该区域内土壤普遍存在氮素缺乏现象。

2.1.2 土壤化学指标

土壤有效磷含量为 13.02~34.33 mg/kg (均值 22.34 mg/kg), 处于二级水平; 土壤速效钾含量为 73.21~104.08 mg/kg (均值 86.28 mg/kg), 处于四级水平。全磷和全钾反映土壤母质的养分水平。调查区域内土壤全磷含量为 0.09~1.39 g/kg (均值 0.79 g/kg), 处于三级水平, 具有明显的空间异质性; 全钾含量为 15.29~17.02 g/kg, 处于三级水平, 表明土壤母质磷钾空间分布均匀且含量适中。

亚表层土壤化学属性与表层土壤相似, EC 值处于一级水平, 表明未受到盐渍化作用, 但养分含量普遍低于表层, 其中土壤有机质含量均值仅为 9.24 g/kg, 处于五级水平, 土壤碱解氮和全氮含量处于六级水平。

表4 土壤物理指标统计表

Tab. 4 Statistics on soil physical indicators

样地编号 Sample number	通气孔隙度/% Aeration porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	总孔隙度/% Total porosity	土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density
S1	5.22±0.99 b	33.09±0.99 abc	38.31±1.50 bc	1.65±0.04 a
S2	6.04±1.60 b	31.86±3.97 bc	37.91±3.12 bc	1.61±0.07 b
S3	5.85±0.98 b	37.72±3.78 ab	43.57±4.34 abc	1.47±0.10 b
S4	10.39±2.20 a	38.83±5.51 a	49.23±7.47 a	1.43±0.21 b
S5	5.35±0.70 b	32.62±0.26 abc	37.97±0.88 bc	1.57±0.02 b
S6	8.26±0.54 ab	37.61±3.96 ab	45.87±3.71 ab	1.41±0.15 b
S7	6.60±0.84 ab	32.77±4.19 abc	39.37±3.37 bc	1.59±0.12 b
S8	4.62±1.51 a	34.40±1.93 abc	39.02±3.36 bc	1.65±0.09 a
S9	7.08±5.64 ab	29.92±1.10 c	37.00±6.36 c	1.64±0.14 a
平均值 Average	6.60±0.48	34.31±0.78	40.92±1.05	1.56±0.02
变异系数/% Coefficient of Variation	38.37	11.77	13.28	8.62
等级 Gradation	五级	-	-	六级

注: 表中数值为“平均值±标准误”, 每列同一指标中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: Data in the table are presented as "mean value ± standard error". Different letters indicate different significance between treatments ($P < 0.05$).

表 5 土壤化学指标统计表
Tab. 5 Statistics on soil chemical indicators

样地编号 Sample number	pH值 pH value	EC值/($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) EC value	有机质 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Organic matter	全氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total Nitrogen	碱解氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Alkaline hydrolyzable nitrogen	有效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available phosphorus	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available potassium	全磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total phosphorus	全钾/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total potassium	
表层 土壤 Topsoil 0-15cm	S1	7.96±0.17 b	185.53±36.51 d	13.85±5.12 abc	0.77±0.11 a	21.47±3.31 a	22.34±3.61 bcd	100.37±4.26 a	0.67±0.49 abc	16.16±0.68 ab
	S2	8.46±0.08 a	326.67±17.16 ab	18.75±1.50 ab	0.75±0.11 a	19.83±2.91 ab	14.90±1.77 d	73.21±1 b	0.09±0.10 c	17.02±1.22 a
	S3	8.31±0.19 ab	249.00±48.54 abcd	15.07±3.54 ab	0.60±0.20 a	17.73±1.07 abc	27.01±4.55 abc	85.04±6.17 b	0.72±0.46 abc	16.29±0.12 ab
	S4	8.28±0.03 ab	310.67±83.03 abc	14.71±1.37 abc	0.73±0.09 a	12.83±2.46 c	31.16±4.62 ab	104.08±13.35 a	0.85±0.70 abc	15.98±0.63 ab
	S5	8.21±0.38 ab	192.93±18.58 d	22.13±4.17 a	0.55±0.37 a	21.00±4.20 ab	34.33±9.99 a	81.01±4.41 b	0.94±0.37 ab	15.62±0.48 ab
	S6	7.93±0.36 b	207.20±37.88 cd	22.13±5.49 a	0.67±0.12 a	16.80±3.90 abc	13.39±3.58 d	86.28±8.25 b	1.00±0.54 ab	15.95±0.63 ab
	S7	8.05±0.12 ab	289.33±45.01 abcd	13.21±3.48 bc	0.55±0.04 a	17.73±0.81 abc	13.02±1.48 d	79.41±4.87 b	0.43±0.16 bc	15.29±1.46 b
	S8	8.21±0.14 ab	346.33±79.11 a	6.53±4.47 c	0.44±0.34 a	14.47±4.55 bc	33.52±3.33 a	84.06±3.63 b	1.39±0.15 a	16.90±0.8 a
	S9	7.94±0.16 b	236.53±58.75 bcd	15.56±5.95 ab	0.43±0.12 a	14.70±3.70 abc	18.75±6.58 cd	83.04±7.78 b	0.94±0.05 ab	16.16±0.49 ab
	均值 Mean	8.15±0.05	259.20±12.73	14.74±1.19	0.58±0.04	16.66±0.82	22.34±3.61	86.28±11.05	0.79±0.08	16.15±0.86
变异 系数/% Coefficient of variation	3.24	26.76	42.45	40.85	28.49	40.15	12.81	58.00	5.33	
等级 Gradation	四级	二级	四级	五级	六级	二级	四级	三级	三级	
亚表层 Subsurface 15-30 cm	S1	8.16±0.27 ab	247.80±50.93 a	4.72±5.05 cd	0.27±0.05 ab	10.03±1.76 bc	15.23±5.97 bcd	72.85±2.56 a	0.91±0.03 a	15.71±0.71 cd
	S2	8.43±0.08 a	358.67±231.53 a	7.34±3.62 cd	0.02±0.02 c	7.00±1.85 cd	11.06±1.57 cde	61.30±1.53 b	0.55±0.48 a	15.59±0.24 cd
	S3	8.34±0.37 a	436.00±276.92 a	6.88±4.11 cd	0.36±0.23 a	9.80±1.40 bc	11.58±2.23 cde	62.52±3.55 b	0.83±0.11 a	14.86±1.04 d
	S4	8.44±0.26 a	469.00±205.81 a	17.05±2.34 a	0.37±0.04 a	8.17±1.76 bcd	15.41±2.01 bcd	77.40±3.2 a	0.97±0.32 a	16.88±1.42 bc
	S5	7.71±0.08 c	222.70±39.57 a	14.20±4.15 ab	0.36±0.17 a	14.00±2.42 a	21.32±4.86 b	61.44±5.48 b	0.89±0.42 a	14.40±1.01 d
	S6	8.14±0.13 abc	254.67±58.05 a	10.10±1.23 bc	0.19±0.12 abc	9.10±0.70 bcd	5.00±0.55 e	71.86±11.02 a	0.69±0.04 a	14.28±0.55 d
	S7	8.26±0.09 a	391.67±95.09 a	3.35±3.60 d	0.06±0.08 bc	10.50±1.85 b	9.14±2.31 de	74.37±7.36 a	0.66±0.41 a	17.85±0.87 ab
	S8	7.80±0.30 bc	551.00±215.59 a	5.95±0.88 cd	0.11±0.13 bc	7.00±1.85 cd	33.75±0.52 a	80.02±3.9 a	0.55±0.52 a	18.53±0.9 ab
	S9	8.37±0.10 a	234.67±24.58 a	7.16±2.99 cd	0.22±0.11 abc	6.07±0.40 d	16.72±6.65 bc	78.98±3.67 a	0.67±0.48 a	19.13±1.05 a
	均值 Mean	8.19±0.07	364.80±27.33	9.24±1.23	0.21±0.04	8.95±0.57	15.47±8.56	71.19±8.57	0.71±0.07	16.36±1.9
变异 系数/% Coefficient of variation	3.82	50.53	56.79	77.56	30.15	55.73	12.26	43.64	11.86	
等级 Gradation	四级	一级	五级	六级	六级	三级	四级	三级	三级	

注：表中数值为“平均值±标准误”，每列同一指标中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Notes: Data in the table are presented as "mean value ± standard error". Different letters indicate different significance between treatments ($P<0.05$).

2.2 土壤剖面不同指标随深度的变化

剖面调查结果可以揭示土壤性质在垂直空间上的变化规律和不同土层之间发生学的联系。结果显示，草坪和乔木人工林不同土层间的土壤容重随深度增加呈下降趋势，通气孔隙度及总孔隙度随深度变化不明显(图 1)。这可能与绿地表层土壤在建设

初期被压实和后期被踩踏有关。两处剖面的通气孔隙度和总孔隙度大致相同，总体偏低。

不同土层的大部分化学指标存在极显著性差异(图 2)。两处剖面土壤 pH 值在垂直方向上的变化较为稳定，其中乔木人工林 0~20 cm 和 40~60 cm 土壤 pH 值极显著大于城市草坪 ($P<0.01$)。土壤剖面有机质

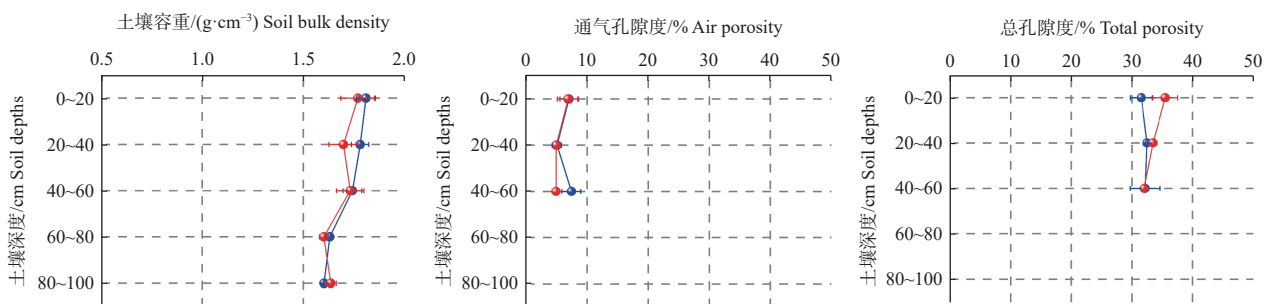


图 1 草坪和乔木人工林土壤剖面物理性质的变化
Fig. 1 Changes in physical properties of soil profiles in lawn and tree plantations

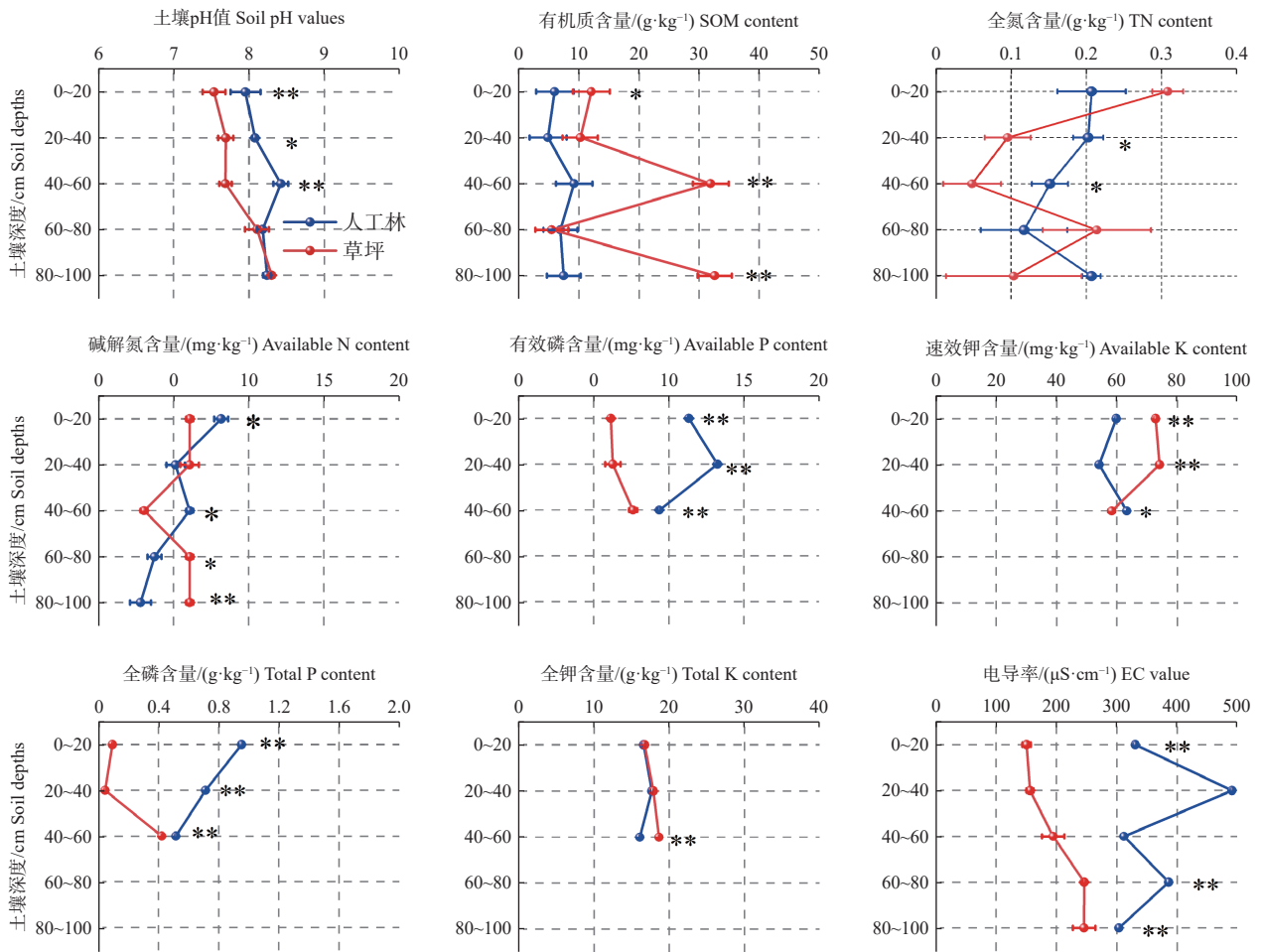


图2 草坪和乔木人工林土壤剖面化学性质的变化

Fig. 2 Changes in the chemical properties of soil profiles in lawn and tree plantations

注: **表示($P < 0.01$), *表示($P < 0.05$)。

Notes: ** indicate ($P < 0.01$), * indicate ($P < 0.05$).

含量存在较大差异,其中乔木人工林有机质含量较为稳定,而草坪土壤有机质则变化剧烈,其中0~20 cm的土壤有机质含量显著大于乔木人工林的对应层次观测值;40~60 cm、80~100 cm的测定结果为极显著性差异($P < 0.05$ 和 $P < 0.01$)。

两处剖面的土壤EC值存在显著的差异($P < 0.05$),其中草坪土壤EC值随深度增加呈缓慢上升趋势,而乔木人工林土壤EC值在20~40 cm、60~80 cm土层出现峰值。两处土壤剖面在0~20 cm、40~60 cm和60~80 cm处的碱解氮含量差异显著($P < 0.05$),在80~100 cm土层之间的差异极显著($P < 0.01$)。两处土壤剖面有效磷和全磷含量在0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层之间具有较好的一致性,其中乔木人工林测定值均极显著大于草坪土壤($P < 0.01$)。土壤速效钾含量在0~20 cm和20~40 cm土层之间的差异极显著($P < 0.01$),草坪土壤大于乔木人工林土壤。土壤全钾含量在0~40 cm趋于相同,但40~60 cm的草坪土壤全钾含量极显著大于乔木人工林土壤($P < 0.01$)。

2.3 土壤质量综合评价

通过对土壤物理和化学指标转化为标准化质量指数(0~3),得到不同单项指标的适宜程度参数(图3)。

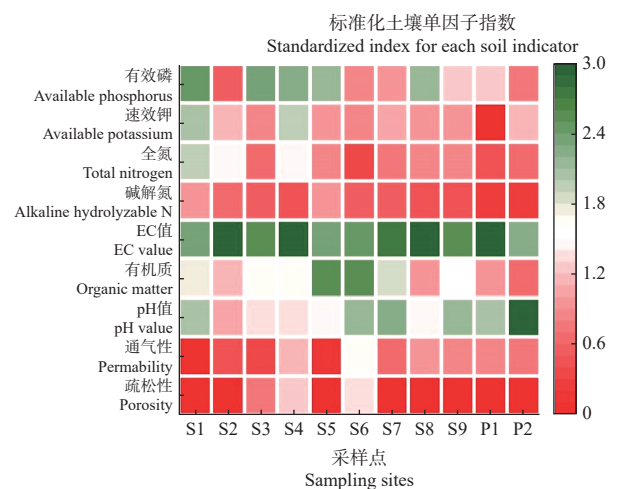


图3 不同样地土壤单项质量指标

Fig. 3 Individual soil quality indicators for different sample sites

在物理性质方面, 绿地土壤疏松性(容重)分值为0~1.37, 得分较低; 土壤通气性分值为0~1.69。除S4和S6以外, 其余采样点都存在严重压实和通气不良的问题。土壤pH值分值为1.06~2.93, S2、S3和S8的pH值分值降低, 存在限制作用。所有采样点的土壤EC值分值较高, 不存在盐害问题。

在养分因子中, 土壤全氮和碱解氮分值均低于1, 说明土壤氮素严重缺乏是严重限制植物生长的障碍因素。P1的速效钾分值最低, S3和S8次之, 其他地点分值适中。S2和P2的有效磷分值较低, 会影响绿化植物正常生长。整体而言, 土壤限制因子主要为通气性不良和压实问题, 其次为碱解氮和全氮含量

严重不足。土壤pH值、盐分和有效磷不是该区域绿地土壤质量的主要限制性因素。

根据土壤单项因素的标准化得分, 进一步计算内梅罗综合指数发现, 表层土壤的修正内梅罗综合指数排序为: S4(1.08), S1(0.95), S6(0.93), S3(0.83), S5(0.79), S7(0.76), S8(0.75), S9(0.74), S2(0.66), P2(0.65), P1(0.62), 均值为0.80(图4)。所有采样点中, 仅S4、S1和S6的分值>0.9, 土壤质量一般, 个别单项指标对植物生长存在限制作用; 其他采样地分值均小于0.9, 说明该填海造陆区土壤质量普遍很差, 养分贫瘠, 大部分土壤质量指标不符合要求, 极大限制植物生长。

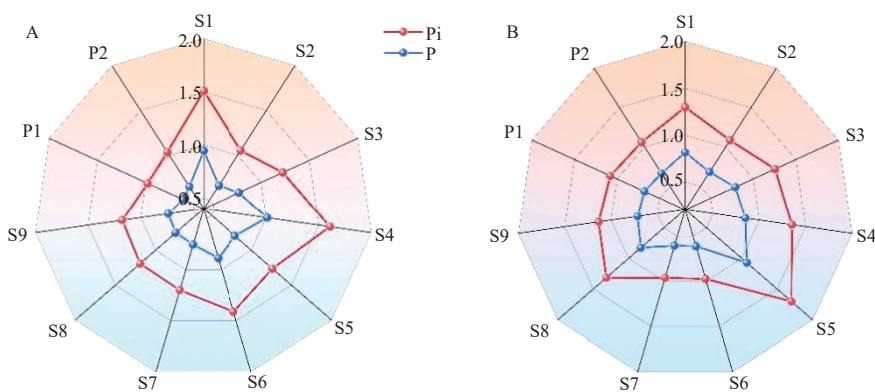


图4 不同样地土壤质量的修正内梅罗综合指数

Fig. 4 Modified Nemerow comprehensive index of soil quality for different sample sites

注: A. 表层土壤; B. 亚表层。

Notes: A. Topsoil; B. Subsurface.

亚表层土壤的修正内梅罗综合指数排序为: S5(1.07), S4(0.85), S8(0.83), S1(0.82), S3(0.79), S9(0.71), S2(0.69), P1(0.68), P2(0.67), S6(0.61), S7(0.60), 均值为0.76, 采样点中除S5外, 其他10个样地的分值均小于0.9, 表明亚表层土壤质量很差, 大部分土壤将严重限制园林植物的生长。

3 结论与讨论

3.1 填海造陆居住区绿地土壤障碍因素诊断

城市绿地土壤受人为活动干扰强烈, 其形成和特性与所处的自然环境无直接关系, 本质上是一种普遍存在的人为土或人为新成土(王淑敏等, 2011; 韩继刚等, 2022)。调查结果显示, 填海造陆后城市绿地土壤属性具有巨大的空间分异特征和在垂直剖面剧烈变化的特点。相比自然土壤, 该填海造陆区绿地土壤属人为工程土, 不同土层的理化性质随剖面深度变化均无一致性的变化规律, 形成无层次且无规律的土体构造。本研究选取了土壤4项物理性

质和9项化学性质(pH值、全氮、碱解氮、全钾、全磷、速效钾、有效磷、EC值和土壤有机质)指标, 并结合土壤质量因子分级评分和内梅罗综合指数法, 对调查范围内填海造陆后居住绿地土壤进行全面体检, 发现土壤通气性不足和土体紧实是限制绿地土壤质量的首要问题。这与城市绿地土壤容重过大和通气孔隙度偏小等物理性障碍因素明显的现象一致(方海兰, 2014; 梁晶等, 2016)。绿地土壤经常受到人为活动踩踏, 表层被严重压实, 非常不利于植物的生长。土壤物理性质的恶化将直接导致植物死亡。

评价结果显示, 碱解氮和全氮含量严重缺乏是该区域绿地土壤普遍存在的限制性肥力因素。这是由于填海造陆区绿地土壤配置过程的不合理和土壤质量不达标造成的。虽然填海造陆区居住绿地覆土层较厚(>120 cm), 但外源覆盖的砂质土壤实际上是岩石风化的成土母质, 缺乏有机质, 氮素贫瘠。相比磷钾元素, 氮素对植物生长的限制作用更为明显。本研究调查样地S3和S4的海棠树和山楂树叶缘枯

黄,果实座果率低,均表现出典型的缺氮症状。土壤氮素严重不足导致绿化植物难以维持长久健康生长状态(朱本国等,2020)。

一般认为,填海造陆区底层土壤容易受海水浸渍影响(Chi et al., 2010)。土壤表层水分蒸发促进底层土壤中可溶性盐随着毛管孔隙上升,可能导致表层土壤积聚大量的盐分。为了防止地下水盐分通过土壤微小孔隙的“毛细作用”进入表层土壤导致次生盐渍化的发生,通常填海造陆区的底部多采用大孔隙比例高的砂土人为覆盖,以阻断盐分随水上升(Chi et al., 2010)。然而,剖面调查结果显示,两种典型绿地土壤的EC值和pH值垂直空间并无明显的变化趋势,未发现盐分在土壤剖面的表聚现象。这表明该客土填充方式能够有效隔绝填海造陆区底层盐分上移,避免了土壤次生盐渍化的发生,但表层和亚表层土壤均存在养分贫瘠问题。

3.2 填海造陆居住区绿地土壤改良措施

土壤通气性不足和土体紧实是影响土壤质量的首要问题。居住绿地居民走动和日常散步运动比较频繁,是造成住宅区绿地土壤压实的重要原因之一(朱本国等,2020)。其次是绿地生态系统的有机物输入不足,导致土壤动物(如蚯蚓)和微生物活动缺乏能量。土壤动物活动可以在土壤中形成透气的大孔隙通道,提高土壤中营养物质的生物可利用性,改善植物根系结构,从而提高植物根系对土壤中营养物质和水分的获取能力,促进植物健康生长(Von Herten et al., 2006)。为解决土壤透气性不良和土壤压实问题,需要在面积较大的绿地铺设行人通道,并设置警示和保护绿地标语,减少人为踩踏,提升居民环境保护意识,避免人为因素造成的土壤压实。对于严重压实的地块需要采取及时翻松、打孔等养护措施,增加土壤通气性。此外,可以通过补充有机肥和覆盖枯枝落叶形式增加土壤有机物,为土壤动物和微生物活动提供能量,使土壤疏松肥沃。

氮是植物生长所必需的养分,主要来自于土壤有机质的矿化。充足的氮素可以帮助植物合成较多的蛋白质,促进细胞分裂和增长(黄丽丹等,2021)。调查区绿地土壤的全氮和碱解氮含量处于六级水平,表明自身供氮能力严重不足。该现象与袁峰均等(2024)发现深圳市填海区绿地土壤碱解氮和全氮严重不足的现象具有一致性。碱解氮与土壤有机质含量与放入氮肥数量有关(刘学彤等,2021)。为解决土壤氮素严重不足问题,短期内可在绿地土壤中施用尿素、复合肥、缓释肥料和液体肥料等高氮化肥,

快速满足植物氮素需求。但依赖于长期施用化肥将导致土壤更加板结,并不能从根本上解决土壤缺氮问题。从长期来看,快速熟化和培肥表土,提高土壤自身“自肥”能力,才能从根本上解决土壤氮素不足的问题。据调查,该区域居住绿化区以施用化肥为主,基本不施用有机肥,致使土壤有机质难以及时得到补充。通过种植具有固氮功能兼具景观功能的绿肥植物如紫花苜蓿 *Medicago sativa* L.、黑麦草 *Lolium perenne* L.和白车轴草 *Trifolium repens* L.等,可有效增加土壤养分,提高生态系统的固氮能力。

根据绿地土壤存在压实严重、通气性能差和有机质缺乏的特点,建议配植根系发达、耐旱的植物(张璐等,2021)。考虑到填海造陆区土壤后期盐分升高的可能性较大,所以在绿化植物选择上,乔木树木类种植需要选择耐旱、耐盐碱树种,包括银杏 *Ginkgo biloba* L.、国槐 *Sophora japonica* Linn.、垂柳 *Salix babylonica* L.、千头椿 *Ailanthus altissima* 'Qiantou'、合欢 *Albizia julibrissin* Durazz.、白蜡 *Fraxinus chinensis* Roxb.、灌木选择紫穗槐 *Amorpha fruticosa* L.、石榴 *Punica Granatum* L.;常绿植物为大叶黄杨 *Buxus megistophylla* H. Lév.、龙柏 *Sabina chinensis* L.;草坪草种应该选择养分消耗较低的高羊茅 *Festuca elata* Keng ex E. B. Alexeev。针对土壤偏碱性的问题,在栽培喜酸性植物时需要区域局部土壤增施酸性改良剂(如硫酸亚铁),采用酸性水溶肥随灌溉冲施而逐步降低土壤pH。

3.3 提高填海造陆居住区绿地土壤质量的意义

土壤质量评价是一项综合程度较高的研究。修正的内梅罗指数法是一种较好的定性与定量评价土壤质量的方法。已有调查结果表明,哈尔滨市城市景观林绿地土壤内梅罗综合指数为2.02~2.24,土壤质量达到肥沃水平(周伟等,2018);长春市绿地土壤质量的内梅罗综合指数为1.5~1.8,南宁新建城市绿地土壤内梅罗指数为1.19~1.78,土壤质量处于一般偏上水平(周伟等,2018;黄丽丹等,2021);南京市城市森林土壤内梅罗综合指数为0.85~1.51(平均为1.19),土壤质量处于一般偏低水平(单奇华等,2009)。相比其他城市绿地土壤,本研究所调研的11个地点中,表层和亚表层土壤的内梅罗综合指数均值为0.80和0.76,其中仅有3个样地表层土壤质量为“一般”,其他样地均为“很差”。相比其他城市绿地土壤质量而言,烟台市填海造陆区住宅绿地土壤质量不佳,肥力贫瘠。

我国东部沿海地区存在大面积利用填海开发住宅社区的情况。由于在居住区绿地建设过程中存在

“重植物、轻土壤”的现象,即绿化植物在居住建成后保持成活状态 2~3 a 就可以通过项目验收。实际上这种模式是存在缺陷的。由于土壤剖面结构不良和养分缺乏,绿植难以保持长久的健康生长状态。填海造陆区绿地建设开工过程中应按照绿地种植土标准严控土壤质量,从源头避免土壤质量不达标的发生。此外,在绿地管理过程中应重视施用有机肥、枯落物堆腐还土和栽培具有生物固氮功能的绿化植物等措施,增强土壤“自肥”能力,加快生土的熟化过程,有利于培肥土壤。

参 考 文 献

- 邓星亮,杨安富,杨丽,等. 2023. 海南岛典型农用地土壤综合肥力评价[J]. 热带作物学报, 44(7): 1497-1505.
- (Deng X L, Yang A F, Yang L, *et al.* 2023. Soil nutrient analysis and comprehensive fertility evaluation of four types of agricultural land in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 44(7): 1497-1505.)
- 方海兰. 2014. 城市土壤生态功能与有机废弃物循环利用[M]. 上海: 上海科学技术出版社: 10-19.
- 韩继刚,李刚,张维维,等. 2022. 城市绿地土壤健康质量问题与对策[J]. 应用生态学报, 33(1): 268-276.
- (Han J G, Li G, Zhang W W, *et al.* 2022. Problems and countermeasures of soil health quality in urban green space[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 33(1): 268-276.)
- 黄丽丹,黄旭光,赵建文,等. 2021. 南宁市新建城市绿地土壤质量评价[J]. 湖北农业科学, 60(6): 36-41.
- (Huang L D, Huang X G, Zhao J W, *et al.* 2021. Evaluation on soil quality of newly-established urban green space in Nanning city[J]. Hubei Agricultural Sciences, 60(6): 36-41.)
- 郝瑞军. 2014. 上海城市绿地土壤肥力特征分析与评价[J]. 上海农业学报, 30(1): 79-84.
- (Hao R J. 2014. Analysis and evaluation of soil fertility characteristics of Shanghai urban green area[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 30(1): 79-84.)
- 季珏,许士翔,安超,等. 2020. 新时期中国城市绿地管理方式的现状、问题及建议[J]. 中国园林, 36(6): 56-59.
- (Ji J, Xu S X, An C, *et al.* 2020. Status, problems and suggestions on current urban Greenland management[J]. Chinese Landscape Architecture, 36(6): 56-59.)
- 梁晶,方海兰,张浪,等. 2016. 基于城市绿地土壤安全的主要生态技术研究及应用[J]. 中国园林, 32(8): 14-17.
- (Liang J, Fang H L, Zhang L, *et al.* 2016. Study and application of main ecological technology based on soil security for urban landscape[J]. Chinese Landscape Architecture, 32(8): 14-17.)
- 黎武标,李志文,王志刚,等. 2019. 山东烟台地区芝罘剖面粒度分维特征及其环境意义[J]. 地球科学与环境学报, 41(5): 592-603.
- (Li W B, Li Z W, Wang Z G, *et al.* 2019. Fractal characteristics of grain size from Zhifu section in Yantai area of Shandong, China and their environmental significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 41(5): 592-603.)
- 刘学彤,郑春莲,曹薇,等. 2021. 长期定位施肥对土壤有机质、不同形态氮含量及作物产量的影响[J]. 作物杂志, (4): 130-135.
- (Liu X T, Zheng C L, Cao W, *et al.* 2021. Effects of long-term located fertilization on soil organic matter, nitrogen forms and crop yields[J]. Crops, (4): 130-135.)
- 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等. 2006. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 26(3): 901-913.
- (Liu Z F, Fu B J, Liu G H, *et al.* 2006. Soil quality: Concept, indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 26(3): 901-913.)
- 毛建华,刘太祥. 2010. 曹妃甸填海造地新陆地的土壤及其改良与绿化[J]. 天津农业科学, 16(2): 1-4.
- (Mao J H, Liu T X. 2010. Effects of soil improvement greening on sea reclamation land in Caofeidian[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 16(2): 1-4.)
- 马文梅. 2011. 滨海土壤理化特性与土壤质量的关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- (Ma W M. 2011. Study on the relationship between physical and chemical properties of coastal soil and soil quality[D]. Yangling: Northwest A & F University.)
- 南江宽,陈效民,王晓洋,等. 2014. 石膏与肥料配施对滨海盐土降盐抑碱的效果研究[J]. 南京农业大学学报, 37(4): 103-108.
- (Nan J K, Chen X M, Wang X Y, *et al.* 2014. Effects of gypsum and fertilizers amendment on reducing salinity and preventing alkalization of coastal saline soil[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 37(4): 103-108.)
- 单奇华,俞元春,张建锋,等. 2009. 城市森林土壤肥力质量综合评价[J]. 水土保持通报, 29(4): 186-190, 223.
- (Shan Q H, Yu Y C, Zhang J F, *et al.* 2009. Comprehensive estimation of soil fertility in urban forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 29(4): 186-190, 223.)
- 史正军,卢瑛,钟晓,等. 2006. 深圳城市绿地土壤质量状况研究[J]. 园林科技 (1): 153-156.
- 伍海兵,李爱平,方海兰,等. 2015. 绿地土壤孔隙度检测方法及其对土壤肥力评价的重要性[J]. 浙江农林大学学报, 32(1): 98-103.
- (Wu H B, Li A P, Fang H L, *et al.* 2015. Green-belt soil testing methods for porosity and the importance of porosity on soil fertility evaluation[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 32(1): 98-103.)
- 王萌. 2015. 人为因素主导下海岸带生态系统变迁探讨[J]. 绿色科技, 17(6): 13-14.
- (Wang M. 2015. Discussion on coastal ecosystem change dominated by anthropogenic factors[J]. Journal of Green Science and Technology, 17(6): 13-14.)
- 王康. 2016. 土壤学与农作学[M]. 4版. 北京: 中国水利水电出版社.
- 吴人韦. 1998. 国外城市绿地的发展历程[J]. 城市规划, 22(6): 39-43.
- (Wu R W. 1998. Development course of urban green space in foreign countries[J]. City Planning Review, 22(6): 39-43.)
- 王淑敏,胥哲明,潘彩霞. 2011. 城市绿地土壤质量评价指标研究进展[J]. 中国园艺文摘, 27(7): 38-40.
- (Wang S M, Xu Z M, Pan C X. 2011. Research progress on indicators of soil quality evaluation of urban green space[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 27(7): 38-40.)

- 项建光, 方海兰, 杨意, 等. 2004. 上海典型新建绿地的土壤质量评价[J]. 土壤, 36(4): 424-429.
- (Xiang J G, Fang H L, Yang Y, *et al.* 2004. Soil quality evaluation of some typical newly-established green belts in Shanghai[J]. Soils, 36(4): 424-429.)
- 谢天, 侯鹰, 陈卫平, 等. 2019. 城市化对土壤生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 39(4): 1154-1164.
- (Xie T, Hou Y, Chen W P, *et al.* 2019. Impact of urbanization on the soil ecological environment: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(4): 1154-1164.)
- 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 2010. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社.
- 许浩. 2005. 日本东京都绿地分析及其与我国城市绿地的比较研究[J]. 国外城市规划, 20(6): 27-30.
- (Xu H. 2005. The analysis and comparison study on Tokyo urban open space and our country's city[J]. Urban Planning Overseas, 20(6): 27-30.)
- 许翼, 许士国, 冷祥阳, 等. 2017. 填海造陆区盐分运移过程室内模拟与分析[J]. 南水北调与水利科技, 15(2): 101-108.
- (Xu Y, Xu S G, Leng X Y, *et al.* 2017. Laboratory simulation and analysis on the salt migration process of coastal reclaimed land[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 15(2): 101-108.)
- 熊健, 赵茜芮, 李伟, 等. 2024. 拉萨河下游湿地土壤养分特征与肥力评价[J]. 水土保持学报, 38(1): 328-336.
- (Xiong J, Zhao X R, Li W, *et al.* 2024. Soil nutrient characteristics and fertility evaluation of wetland in the lower reaches of the Lhasa River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 38(1): 328-336.)
- 袁峰均, 史正军, 潘松, 等. 2024. 深圳市典型建筑渣土填海区绿地土壤理化特征研究[J]. 绿色科技, 26(1): 1-6, 45.
- (Yuan F J, Shi Z J, Pan S, *et al.* 2024. Study on soil constraining factors of green space in typical reclamation area of Shenzhen City[J]. Journal of Green Science and Technology, 26(1): 1-6, 45.)
- 张璐, 杨帆, 王志春. 2021. 碱化对土壤性质和植物生理生态特征的影响[J]. 东北农业科学, 46(2): 30-36.
- (Zhang L, Yang F, Wang Z C. 2021. Effects of alkalization on soil properties and plant physiological and ecological characteristics[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 46(2): 30-36.)
- 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 2010. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究[J]. 土壤学报, 47(3): 422-428.
- (Zhao X F, Yang J S, Yao R J. 2010. Characteristics of soil salinization in mudflat of north Jiangsu province based on canonical correspondence analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 47(3): 422-428.)
- 朱本国, 王丽娟, 胡艳燕, 等. 2020. 重庆城市绿地土壤质量现状分析与改良建议[J]. 现代园艺, (15): 30-32.
- (Zhu B G, Wang L J, Hu Y Y, *et al.* 2020. Analysis on the present situation of soil quality of urban green space in Chongqing and suggestions for improvement[J]. Xiandai Horticulture, (15): 30-32.)
- 中国土壤调查办公室. 1979. 全国第二次土壤普查养分分级标准[M]. 北京: 中国农业出版社.
- 郑垒, 于君宝, 王光美, 等. 2013. 曹妃甸吹填区土壤障碍特征研究[J]. 土壤通报, 44(2): 455-458
- (Zheng L, Yu J B, Wang G M, *et al.* 2013. A study on the constraining characteristics of the dredged filled soil in Caofeidian industrial district[J]. Chinese Journal of Soil Science, 44(2): 455-458.)
- 周伟, 王文杰, 何兴元. 等. 2018. 哈尔滨城市绿地土壤肥力及其空间特征[J]. 林业科学, 54(9): 9-17.
- (Zhou W, Wang W J, He X Y. *et al.* 2018. Soil fertility and spatial variability of urban green land in Harbin[J]. Scientia Silvae Sinicae, 54(9): 9-17.)
- 上海市园林绿化标准化技术委员会. 2019. 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.
- 国家林草局. 1999. 森林土壤水分-物理性质的测定 LY/T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社.
- Carter M R, Gregorich E G, Anderson D W, *et al.* 1997. Chapter 1 Concepts of soil quality and their significance[M]. Developments in Soil Science. Amsterdam: Elsevier: 1-19.
- Chi C M, Wang Z C. 2010. Characterizing Salt-Affected Soils of Songnen Plain Using Saturated Paste and 1:5 Soil-to-Water Extraction Methods [J]. Arid Land Research and Management, 24(1): 1-11.
- EK Bünemann, Bongiorno G, Bai Z, *et al.* 2018. Soil quality - A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 120-105.
- Jiang H, Du H, Bai Y, *et al.* 2016. Effects of spatiotemporal variation of soil salinity on fine root distribution in different plant configuration modes in new reclamation coastal saline field[J]. Environmental Science and Pollution Research, 23(7): 6639-6650.
- Li J, Pu L, Zhu M, *et al.* 2014. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review[J]. Geoderma, 226-227: 130-139.
- Mausel P W. 1971. Soil quality in Illinois: an example of a soils geography resource analysis[J]. The Professional Geographer, 23: 127-136.
- Shi Z, Wang R, Huang M X, *et al.* 2002. Detection of coastal saline land uses with multi-temporal landsat images in Shangyu City, China[J]. Journal of Environmental Management, 30(1): 142-150.
- Von Herten L, Haahntela T. 2006. Disconnection of man and the soil: reason for the asthma and atopy epidemic?[J]. Journal of Allergy & Clinical Immunology, 117(2): 334-344.
- Yt A, Jin W A, Si B, *et al.* 2014. Soil and soil environmental quality monitoring in China: A review—Science Direct[J]. Environment International, 69: 177-199.