

上海市人工林土壤理化性质与群落特征的相关性

许俊丽^{1,2}, 张桂莲³, 张希金¹, 高志文¹, 仲启铨³, 张亚萍¹, 宋 坤^{1,2}, 达良俊^{1,2}

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241; 2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 3. 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232)

摘要: 人工林是城市具生命绿色基础设施的重要组成部分, 土壤是人工林健康可持续发展的基础。在上海市域范围内选取 5 种主要人工林群落类型样地 34 个, 分层采集 0~100 cm 土壤剖面样品, 对人工林土壤理化性质与植物群落特征的相关性进行了研究。结果表明: ①上海市人工林土壤容重偏高($1.07\sim 1.67\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 土壤 pH $5.7\sim 8.3$, 土壤电导率(EC)为 $0.03\sim 0.40\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 碱解氮($5.4\sim 183.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 有效磷($1.4\sim 80.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和有机质($3.33\sim 42.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)相对匮乏; 土壤 pH 值、碱解氮和有机质随土层加深表现出一定的变化规律, 并在不同土层间差异显著; 土壤容重、有效磷和 EC 在各土层间无显著变化规律。②有机质分别与土壤容重、pH 值、碱解氮和有效磷在 0~30 cm 土层显著相关($P<0.05$); 碱解氮和 pH 值在 0~30 cm 显著相关($P<0.05$)。③0~10 cm 土层, 群落郁闭度与土壤 EC 显著负相关($P<0.05$), 碱解氮和有机质与样地乔木平均胸径和草本层盖度显著正相关($P<0.05$)。受城市化和人类活动影响, 在对人工林进行管理时, 应考虑城市人工林的复杂性与差异性, 针对不同类型林地制定相应的个性化管理措施, 促进人工林长效健康可持续发展。图 3 表 4 参 33

关键词: 森林土壤学; 人工林; 土壤; 理化性质; 植被类型; 龄组

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)06-1017-10

Soil physical and chemical properties and effects of plant community characteristics in forest plantations of Shanghai City

XU Junli^{1,2}, ZHANG Guilian³, ZHANG Xijin¹, GAO Zhiwen¹, ZHONG Qicheng³, ZHANG Yaping¹,
SONG Kun^{1,2}, DA Liangjun^{1,2}

(1. College of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. Shanghai Key Laboratory for Ecology of Urbanization Process and Eco-restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China)

Abstract: Forest plantations are an important component of urban green infrastructure with soil being fundamental for healthy and sustainable development of forest plantations. To understand the soil physical and chemical properties and their connection to plant community characteristics, thirty four 25 m×25 m plots from five main forest plantations types in Shanghai were selected. Each soil sample was a mixture of three sub-samples taken from each layers in 1 m × 1 m × 1 m soil profile, and plant community characteristics were surveyed at the same time. One-way analysis of variance was applied to test the differences of soil properties (SPSS ver. 23). Pearson's correlation analysis was performed to assess the relationships between soil properties and community characteristics with software R, ver. 3.2.0. Results showed that (1) soil bulk density was between 1.07–

收稿日期: 2017-12-15; 修回日期: 2018-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31770468); 国家青年科学基金资助项目(31500355); 上海市科委崇明科技专项资助项目(15dz1208104)

作者简介: 许俊丽, 博士, 从事城市生态学、森林健康评价等研究。E-mail: xujl0909@126.com。通信作者: 达良俊, 教授, 博士, 博士生导师, 从事植被生态学、植被工程学和城市生态学等研究。E-mail: lj-da@des.ecnu.edu.cn

1.67 g·cm⁻³. Most of the soils were alkaline to weakly acidic (soil pH range of 5.7–8.3). The soil electric conductivity range of 0.03–0.40 mS·cm⁻¹, and available N range of 5.4–183.4 mg·kg⁻¹, available P range of 1.4–80.5 mg·kg⁻¹, and organic matter range of 3.33–42.88 g·kg⁻¹. Soil pH, available N, and organic matter presented regular dynamics and significant differences between different soil layers ($P<0.05$). Soil bulk density, available P, and electric conductivity had no large change between different soil layers. (2) At 0–30 cm soil depth, organic matter was significant related to soil bulk density, soil pH, available N, and available P ($P<0.05$). Available N and pH were also significant related ($P<0.05$). (3) At 0–10 cm soil layers, tree canopy density had significant negative relationship with soil electric conductivity ($P<0.05$); available N significant had positive relationship with diameter at breast high and herbaceous layer cover ($P<0.01$); organic matter had significant positive relationship with diameter at breast high ($P<0.05$) and herbaceous layer cover ($P<0.01$). In conclusion, with rapid urbanization and intensive human activities, the complexity and disparity of forest plantations types should be considered when making specific management measures, rather than simply being based on previous study results, thereby promoting a healthy and sustainable development of forest plantations. [Ch, 3 fig. 4 tab. 33 ref.]

Key words: forest soil science; forest plantations; soil; physical and chemical properties; forest type; age group

人工林是城市绿色基础设施的重要组成部分^[1]。第八次全国森林资源清查显示, 中国森林面积达 2.08 亿 hm², 其中人工林面积 0.69 亿 hm², 占林地总面积 33%, 居世界首位。现阶段, 人工林已占据了宜林荒山荒地的优越地段, 在国家严格实施生态红线保护政策, 要求扩大森林覆盖率加强森林保护的背景下, 在造林地数量和立地质量增长潜力有限且人工林地力逐渐衰退的情况下, 未来林业发展过程中, 如何保护好现有林地, 提高人工林生态功能, 促进林地健康可持续发展, 是事关林业发展战略的重大问题^[2]。土壤是植物群落发生和发展的基础, 是森林生态系统的重要组成部分^[3], 也一直是生态学研究的重点内容之一。土壤作为森林生态系统中诸多生态过程的载体, 直接或间接地影响林木的健康发展^[4-5], 而森林植被的存在亦不断地影响森林土壤的形成与发育^[6]。有别于天然林土壤, 人工林土壤, 尤其是高度城市化背景下的人工林, 受人类活动的影响, 在保留自然土壤特征的基础上, 同时具有自身独特的土壤特征, 如土壤紧实, 碎石、玻璃和木屑等外源侵入物高, 偏碱性, 有机质低和生物活性低等特点^[7-8]。作为中国乃至全球的贸易、经济和工业中心, 上海的城市化率从 1979 年的 60.7% 上升为 2015 年的 87.6%, 居全国之首。上海市经过近 20 a 的造林绿化, 森林覆盖率从 1999 年的 3.17% 增加到 2016 年年底的 15.56%, 其中 99% 以上为人工林^[9]。关于上海城市森林土壤, 学者从土壤质量评价、土壤自身理化性质、土壤养分和土壤微生物等方面进行了研究^[10-12]。但以往的这些研究, 多集中于浅层土壤, 且较多地局限于土壤本身特征, 对于土壤和植物群落之间的相互作用与影响, 则鲜有报道。本研究选择上海市域范围内具代表性的人工林为对象, 分层采集 0~100 cm 人工林土壤剖面样品, 结合植物群落特征调查, 明确上海人工林林下土壤理化性质状况, 探讨植物群落与土壤理化性质的相互作用与影响, 以期为人工林的健康发展提供参考。

1 研究区概况

上海市(31°14'N, 121°29'E)位于长江三角洲以太湖为中心的碟形洼地的东缘, 属长江三角洲冲积平原的一部分, 为北亚热带季风气候, 冬冷夏热, 年均气温为 15.2~15.9 °C, 雨量充沛, 光照充足, 年无霜期约为 250 d。境内平均海拔为 4 m 左右, 整体特点是地势低平^[13]。地带性植被为含有落叶成分的常绿阔叶林, 在长期人为活动影响下, 自然植被遭到很大程度破坏^[14]。目前较常见的植被类型为常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林和落叶针叶林、针阔混交林^[15]。2016 年, 上海全市林地面积为 11.13 万 hm², 其中森林面积为 9.87 万 hm², 森林面积中, 乔木林地面积为 8.45 万 hm², 占森林总面积的 85.6%, 树种主要有樟树 *Cinnamomum camphora*, 栎树 *Koelreuteria paniculat*, 女贞 *Ligustrum lucidum*, 水杉 *Metasequoia glyptostroboides*, 池杉 *Taxodium ascendens*, 落羽杉 *Taxodium distichum*, 喜树 *Camptotheca acuminata* 等。从上海城市森林径级结构看, 小径阶组(5.0~12.9 cm), 中径阶组(13.0~24.9

cm), 大径阶组 (25.0~36.9 cm), 特大径阶组 (≥ 37.0 cm) 和其他径阶组 (< 5.0 cm) 分别占森林面积的 43.7%, 29.5%, 3.3%, 0.2% 和 23.3%^[9]。至 2016 年底, 上海市共划分为 16 个区、1 个县, 不同区县间, 崇明县森林覆盖率最高, 占整个上海市森林面积的 27.54%, 中心城区森林覆盖率最低, 仅占上海市森林总面积的 3.1%^[9]。研究区内除西南部零散山丘为残积弱富铝化母质所发育的黄棕壤外, 平原地区均为江、海、河、湖等不同沉积母质所发育而成的水稻土、灰潮土和滨海盐土。

2 研究方法

2.1 样地选择与调查

2016 年 7 月, 在上海市崇明、宝山、虹口、长宁、青浦、浦东、松江、奉贤、金山共 9 个区县范围内, 按照《生态系统固碳观测与调查技术规范》^[16]中森林样地野外调查和设置方法, 选取代表性人工林样地 34 个, 采样点分布见图 1。

在样地四周保留至少 5~10 m 缓冲区的林地内, 选取 25 m × 25 m 的样地, 对样地内胸径 (DBH) 超过 5 cm 的林木进行每木测量, 记录其种名、胸径和高度; 对胸径小于 5 cm 的树木, 估测其盖度及高度。树高采用激光测距仪 (Vertex VL5) 进行测量, 样点地理坐标采用全球定位系统 (GPS, 佳明 Map621SC) 进行定位, 乔木层郁闭度和灌木层及草本层盖度用目视法进行估算。各样地基本信息见表 1。

2.2 土壤样品采集与测定

在每个样地外 1~5 m 范围内, 挖取 1 m × 1 m × 1 m 土壤剖面, 按 0~10、10~30、30~100 cm 分层采集土壤样品, 重复 3 次·样品⁻¹, 用于测定化学性质的土壤样品混匀后装袋带回实验室, 样品除去石砾、根系等杂物后, 自然风干, 粉碎后过 2 mm 筛, 于 2016 年 9~10 月进行测定。

土壤容重采用环刀 (100 cm³) 取样分析法测定; pH 值采用 $V(\text{水}):V(\text{土})=2.5:1.0$ 的电位法测定; 土壤电导率 (EC) 采用 $V(\text{水}):V(\text{土})=5.0:1.0$ 的电导法测定; 碱解氮用碱解-扩散法测定; 有效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提法测定; 有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。

2.3 数据处理与分析

采用 SPSS 23.0 对土壤理化性质进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)。当方差齐性时, 采用最小显著差法 (LSD) 进行多重比较; 方差不齐时, 采用塔姆黑尼法 [$T_2(\underline{M})$] 进行多重比较。土壤理化性质及与群落特征的相关性在 R3.2.0 中进行分析。

3 结果与分析

3.1 土壤理化性质

上海市人工林各土层土壤容重在不同样地间表现为弱变异。土壤 pH 值整体表现出随土壤深度增加而递增趋势, 0~10 cm 和 30~100 cm 土层间差异显著 ($P < 0.05$), 各样地间 pH 值呈弱变异性。土壤电导率不同样地间表现为中等变异。土壤碱解氮各土层间差异显著 ($P < 0.05$), 且随着土壤深度增加而降低, 不同样地间表现出中等强度变异。有效磷在不同样地间表现为高度变异, 变异系数随土层深度增加分别达 1.12, 1.09 和 1.16。有机质在不同土层间差异显著, 随土壤深度增加而显著递减 ($P < 0.05$) (表 2)。

3.2 土壤理化性质之间的关系

由表 3 可知: 0~10 cm 土层, 有机质与土壤容重呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 pH 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与碱解氮、有效磷呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 碱解氮与 pH 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。10~30 cm 土层, 有机质与土壤容重呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 pH 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与碱解氮、有效磷呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 碱解氮与 pH 值呈显著负相关 ($P < 0.05$)。30~100 cm 土层, 土

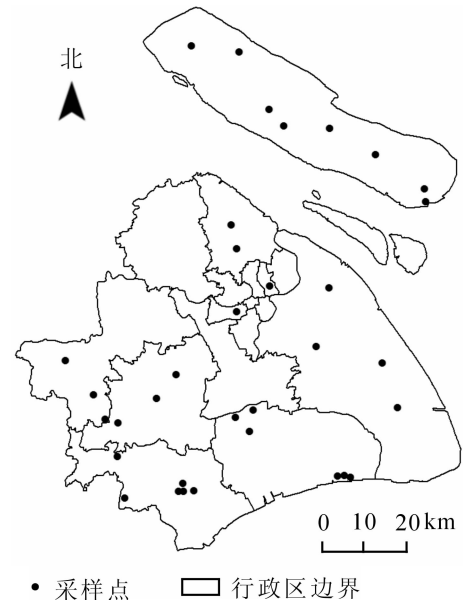


图 1 采样点位置示意图

Figure 1 Location of sampling sites

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic informations of sampling sites

样地 编号	群落优势种	植被 类型	平均 高/m	平均 胸径/ cm	单位胸高 断面积/ (cm ² ·m ⁻²)	郁闭 度/%	灌木 层盖 度/%	草本 层盖 度/%	林龄/ a	龄组
1	喜树 <i>Camptotheca acuminata</i> +女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	FT2	11.0	11.8	16.1	55	1	75	10	AG1
2	栎树 <i>Koelreuteria paniculat</i> +杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i>	FT2	7.5	22.6	15.3	35	0	0	16	AG3
3	池杉 <i>Taxodium ascendens</i> +樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	FT5	10.0	16.8	17.1	50	5	40	14	AG2
4	樟树+旱柳 <i>Salix matsudana</i>	FT2	8.0	14.7	6.6	30	3	35	11	AG2
5	落羽杉 <i>Taxodium distichum</i>	FT4	11.0	15.6	31.1	80	0	0	11	AG2
6	栎树	FT3	9.5	14.0	10.1	50	0	0	12	AG2
7	水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	FT4	18.0	17.0	28.8	85	0	0	16	AG3
8	喜树+樟树	FT2	8.6	12.8	5.7	60	40	30	9	AG1
9	樟树	FT1	7.0	15.7	13.3	30	40	70	13	AG2
10	水杉+国槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	FT5	18.0	10.8	29.9	85	2	0	18	AG3
11	广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> +栎树	FT2	9.0	12.9	12.1	40	8	0	10	AG1
12	樟树+石榴 <i>Punica granatum</i>	FT2	8.5	12.6	8.1	55	40	0	19	AG3
13	喜树+樟树	FT2	9.0	16.7	18.0	40	25	30	19	AG3
14	旱柳 <i>Salix matsudana</i> +紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i>	FT3	6.6	14.6	20.5	40	15	10	14	AG2
15	杨 <i>Populus</i> sp.	FT3	19.0	23.3	16.5	65	1	0	16	AG3
16	樟树	FT1	8.0	8.8	44.5	95	3	0	15	AG2
17	水杉	FT4	13.5	13.6	29.4	80	3	0	29	AG4
18	女贞	FT1	6.0	6.4	7.8	50	0	0	11	AG2
19	水杉+女贞	FT5	12.0	12.6	11.4	65	15	0	28	AG4
20	银杏 <i>Ginkgo biloba</i> +杜英	FT2	5.6	8.5	10.7	65	10	0	10	AG1
21	水杉+樟树	FT5	9.5	14.3	9.5	40	0	0	12	AG2
22	水杉	FT4	14.5	19.4	17.8	20	0	20	36	AG4
23	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> +毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	FT3	9.0	6.7	3.9	75	10	5	11	AG2
24	鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i>	FT3	16.0	11.6	21.8	90	75	30	16	AG3
25	樟树+栎树+女贞	FT2	8.5	10.2	14.2	25	0	0	16	AG3
26	落羽杉 <i>Taxodium distichum</i> +樟树+池杉	FT5	10.5	10.9	33.1	80	15	10	17	AG3
27	落羽杉	FT4	10.0	15.6	26.0	40	0	3	10	AG1
28	水杉+樟树	FT5	7.0	13.8	8.0	15	0	0	10	AG1
29	杜英+樟树	FT1	7.1	15.4	13.9	50	0	2	11	AG2
30	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> +粉柏 <i>Sabina squamata</i>	FT5	17.0	18.1	21.4	75	20	45	10	AG1
31	杨+白玉兰 <i>Michelia alba</i>	FT3	10.9	12.2	22.1	80	1	0	15	AG2
32	雪松 <i>Cedrus deodara</i> +乌桕 <i>Sapium sebiferum</i>	FT5	7.4	17.6	12.7	70	15	5	16	AG3
33	樟树	FT1	9.8	16.6	20.0	60	0	95	13	AG2
34	水杉+樟树	FT5	10.0	16.7	38.8	75	5	5	11	AG2

说明：单位胸高断面积表示样地内单位面积土地内乔木胸高处的横切面面积(cm²·m⁻²)，用以表征乔木密度和植株大小；林型 FT1~FT5 分别表示常绿阔叶林(FT1)，常绿落叶阔叶混交林(FT2)，落叶阔叶林(FT3)，落叶针叶林(FT4)和针阔混交林(FT5)；林龄组 AG1~AG4 分别表示林龄≤10 a(AG1)，11~15 a(AG2)，16~20 a(AG3)和>20 a(AG4)4 个龄组

壤电导率与容重呈显著负相关，有机质与 pH 值显著负相关，与有效磷显著正相关($P<0.05$)。

3.3 土壤理化性质与群落结构特征之间的相关性

群落结构特征仅与 0~10 cm 土层的土壤部分理化指标有相关性，与 10~30 cm 和 30~100 cm 土层的土壤理化指标间无显著相关性($P<0.05$)(表 4)。其中，乔木平均胸径与碱解氮、有机质呈显著正相关，乔木郁闭度与电导率呈显著负相关($P<0.05$)；草本层盖度与碱解氮、有机质呈显著正相关($P<0.01$)。

3.4 不同植被类型间土壤理化性质的变化

不同植被类型人工林土壤理化性质不存在一致变化规律。0~10 cm 土层，电导率在落叶阔叶林

表 2 上海市人工林土壤理化性质统计分析 (n=34)

Table 2 Statistical results of physical and chemistry properties of the soils under forest plantations in Shanghai City (n=34)							
项目	土层深度/cm	$\rho_{\text{土壤}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	pH 值	$\sigma/(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$	$w_{\text{碱解氮}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{有效磷}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{有机质}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
最大值	0~10	1.67	8.3	0.31	183.4	80.5	42.88
	10~30	1.62	8.5	0.34	156.6	42.5	35.08
	30~100	1.63	8.6	0.40	115.7	42.7	27.75
最小值	0~10	1.11	5.7	0.03	9.9	2.7	8.72
	10~30	1.12	6.2	0.04	5.4	1.4	5.47
	30~100	1.07	6.7	0.05	5.8	1.7	3.33
平均值	0~10	1.35 a	7.6 a	0.11 a	80.7 a	13.8 a	20.06 a
	10~30	1.42 a	7.9 ab	0.12 a	52.3 b	10.1 a	14.55 b
	30~100	1.40 a	8.0 b	0.14 a	31.3 c	7.4 a	10.26 c
中位数	0~10	1.36	7.9	0.10	70.6	8.5	18.00
	10~30	1.43	8.1	0.11	41.1	6.3	13.17
	30~100	1.42	8.2	0.14	25.9	4.6	9.70
标准差	0~10	0.11	0.8	0.06	48.1	15.4	8.09
	10~30	0.13	0.6	0.07	37.0	11.04	6.89
	30~100	0.12	0.5	0.07	21.4	8.61	4.15
变异系数	0~10	0.08	0.10	0.57	0.6	1.12	0.40
	10~30	0.09	0.08	0.56	0.7	1.09	0.47
	30~100	0.08	0.06	0.50	0.68	1.16	0.40

说明：不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

(FT3)，落叶针叶林(FT4)和针阔混交林(FT5)间差异显著($P<0.05$)。10~30 cm 土层，各林型间土壤理化性质差异不显著($P<0.05$)。30~100 cm 土层，落叶阔叶林(FT3)土壤碱解氮含量显著低于其他林型($P<0.05$)(图 2)。

3.5 不同龄组间土壤理化性质的变化

各土层间，随龄组增加，土壤容重无显著变化趋势；不同龄组和不同土层间，pH 值无明显变化规律；土壤电导率表现出随林龄增加先降低后增加的趋势，0~10 cm 土层间，林龄大于 20 a 的龄组(AG4)的电导率显著高于林龄<10 a(AG1)，11~15 a(AG2)，16~20 a (AG3)的龄组，但在 10~100 cm 土层间差异不显著($P<0.05$)；对于土壤碱解氮和有机质，随着林龄增长，不同土层间均呈现增加(AG1~AG2)—减少(AG2~AG3)—增加(AG3~AG4)的趋势，其中 10~30 cm 土层，AG3 龄组土壤碱解氮显著低于 AG2 和AG4 龄组，AG3 龄组有机质显著低于 AG2 龄组($P<0.05$)；对于土壤有效磷，随着林龄的增长，各土层间变化无明显规律(图 3)。

表 3 土壤理化性质之间的相关性 (n=34)

Table 3 Correlation coefficient between soil physical and chemical properties (n=34)						
指标	土层深度/cm	容重	pH 值	电导率	碱解氮	有效磷
pH 值	0~10	0.276				
	10~30	0.232				
	30~100	0.085				
电导率	0~10	-0.206	0.204			
	10~30	-0.284	-0.037			
	30~100	-0.346*	0.060			
碱解氮	0~10	-0.268	-0.546**	0.197		
	10~30	-0.312	-0.371*	0.272		
	30~100	-0.132	0.091	0.223		
有效磷	0~10	-0.303	-0.276	0.080	0.235	
	10~30	-0.214	-0.232	0.147	0.315	
	30~100	0.049	0.072	0.081	-0.057	
有机质	0~10	-0.404*	-0.500**	0.244	0.822**	0.531**
	10~30	-0.346*	-0.500**	0.303	0.797**	0.480**
	30~100	-0.195	-0.363*	0.161	0.231	0.460**

说明：* 表示差异显著 ($P<0.05$)；** 表示差异极显著 ($P<0.01$)

表 4 土壤理化性质和群落结构之间的关系 (n=34)

Table 4 Correlation coefficient between soil physical and chemistry properties and the community structure (n=34)							
指标	土壤深度/cm	平均高	平均胸径	胸高断面积	郁闭度	灌木层盖度	草本层盖度
容重	0~10	-0.028	-0.198	-0.261	0.028	-0.011	-0.140
	10~30	0.000	0.055	-0.006	0.259	0.001	-0.095
	30~100	0.029	-0.219	-0.152	0.181	0.148	-0.056
pH 值	0~10	-0.139	-0.224	-0.116	-0.103	0.173	-0.226
	10~30	-0.059	-0.069	0.007	-0.082	0.118	-0.074
	30~100	0.038	0.107	0.096	-0.119	-0.048	0.061
电导率	0~10	-0.201	0.214	0.096	-0.366*	-0.088	0.159
	10~30	0.066	0.302	0.315	-0.184	0.025	0.295
	30~100	0.096	0.292	0.153	-0.148	-0.028	0.145
碱解氮	0~10	0.193	0.515**	0.215	0.038	-0.005	0.510**
	10~30	-0.088	-0.099	0.103	-0.224	-0.138	0.162
	30~100	0.017	0.018	0.099	-0.274	-0.079	0.164
有效磷	0~10	0.132	-0.116	0.100	-0.065	-0.024	0.252
	10~30	0.221	-0.036	0.086	-0.139	0.083	0.296
	30~100	0.286	-0.040	0.045	-0.072	0.020	0.012
有机质	0~10	0.093	0.352*	0.157	-0.007	0.146	0.584**
	10~30	-0.065	-0.013	0.056	-0.175	0.042	0.260
	30~100	0.160	0.030	-0.145	-0.283	-0.008	0.107

说明：* 表示差异显著 (P<0.05)；** 表示差异极显著 (P<0.01)

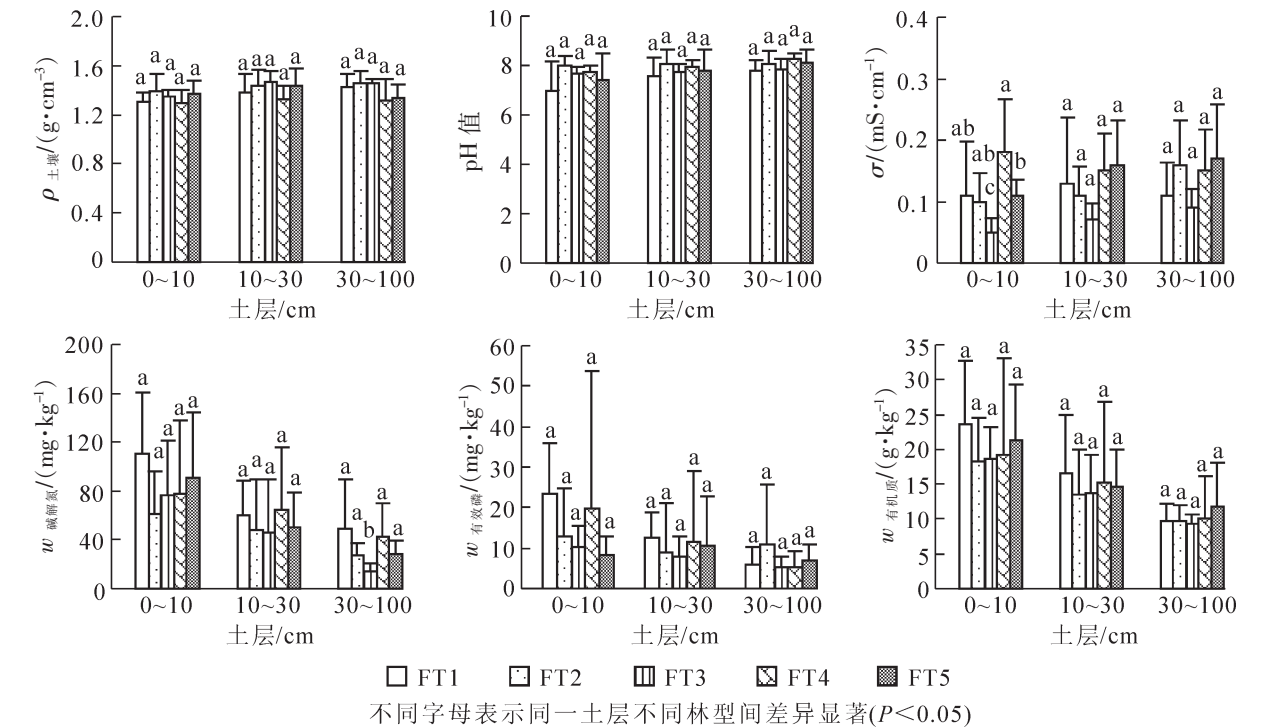


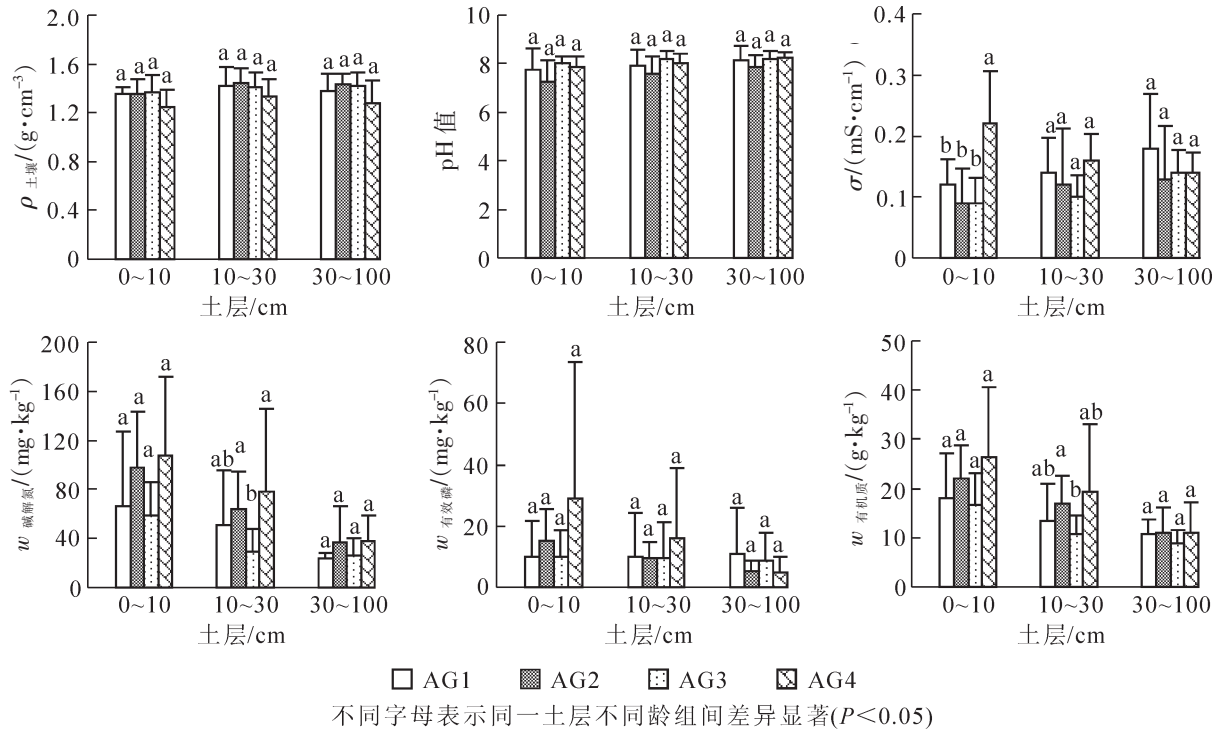
图 2 不同林型间土壤理化性质 (n=34)

Figure 2 Soil physical and chemistry properties between different forest plantation types (n=34)

4 讨论

4.1 土壤理化性质特征

上海人工林土壤容重均值为 1.35~1.42 g·cm⁻³，高于《绿化种植土壤》^[17]规定的绿化种植土本底容重

图 3 不同龄组间土壤理化性质 ($n=34$)Figure 3 Soil physical and chemistry properties between different age group ($n=34$)

小于 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的标准。本研究土壤 pH 值均值为 $7.6 \sim 8.0$ 。就上海土壤本底值而言, 土壤 pH 值多数为 $7.0 \sim 8.0$ ^[18]。对于大多数植物来讲, 最适宜 pH 值范围为弱酸性到弱碱性, 整体上海人工林土壤 pH 值偏高。有研究表明: 土壤电导率在 $0.35 \sim 1.0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 最适宜^[19]。本研究土壤电导率均值为 $0.11 \sim 0.14 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 低于植物生长适宜值, 亦低于《绿化种植土壤》^[17]的技术要求 ($0.15 \sim 0.9 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)。此外, 对于非盐渍化土壤, 电导率值亦可以作为土壤肥力的一个综合性参考指标^[20-21]。可认为上海市人工林土壤整体处于营养匮乏状态。本研究中土壤碱解氮均值为 $31.3 \sim 80.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与全国第二次土壤普查养分分级标准相比^[22], 碱解氮偏低。土壤有效磷均值在 $7.4 \sim 13.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层处于中上等肥力水平 ($10 \sim 19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), $30 \sim 100 \text{ cm}$ 土层则处于中下等肥力水平 ($5 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。土壤有机质为 $10.26 \sim 20.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相较于《绿化种植土壤》^[17]技术要求, 有机质质量分数应在 $20 \sim 80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本研究结果中, 有机质在表层土中最高, 接近该技术标准最低值, 土壤有机质较为匮乏。

4.2 土壤理化性质之间的相互作用

土壤是复杂的生态系统, 其理化性质相互作用, 并受人类活动的影响而发生改变。本研究中土壤容重与有机质在 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层显著负相关, 可能与土壤有机质可以促进土壤团粒结构的形成, 降低土壤容重有关^[23]。土壤 pH 值与碱解氮和有机质均呈显著负相关, 可能是因为对于本身偏碱的土壤来讲, 随着 pH 值升高, 过碱的环境会抑制土壤微生物的数量^[24], 使得地表枯枝落叶被微生物分解而进入土壤的量减少, 从而降低了土壤有机质含量。土壤有机质的改善是土壤理化性质改善的主要原因之一^[25], 在影响土壤其他理化性质方面发挥着重要作用。本研究中土壤有机质与碱解氮及有效磷在 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层显著相关, 这与魏强等^[26]的研究结果一致, 一定程度上表明有机质低可能是导致碱解氮和有效磷偏低的重要原因。本研究表明: 作为土壤肥力的一个综合性参考指标, 低的土壤电导率应引起重视, 增加土壤养分含量, 是提高上海人工林土壤质量的重要任务之一。

4.3 群落特征对土壤理化性质的影响

植物群落通过其冠层结构和根系的呼吸、吸附等作用以及枯落物的分解, 直接或间接地影响土壤理化性质^[27-28]。有研究表明: 乔木高度、胸径及冠幅等生长指标与土壤 pH 值、有机质、碱解氮及有效磷存在显著相关性^[29], 而本研究中乔木高度与土壤各理化性质均无显著相关性。这可能是因为上海人工林建设初期, 有些林分为大规模幼树造林, 有些林地为大树移植营造, 大树在移栽过程中会进行截杆处

理, 本研究中个别样地乔木高度可能不能完全代表植株理论生长高度, 导致本研究结果与前人研究结果不完全一致。乔木胸径与上层土壤碱解氮和有机质呈正相关, 根据异速生长模型, 胸径大的林木其枝叶生物量较大, 因此林下调落物较多, 对土壤有机质养分补充较多。0~10 cm 土层土壤电导率值与乔木层郁闭度显著负相关, 可能是因为郁闭度高的群落, 其遮光效果好, 土壤水分蒸散量减少, 造成土壤含水量相对较高, 而土壤电导率与土壤含水率呈负相关关系。

林下植被对土壤理化性质也存在显著影响, 移除林下植被和地上凋落物可降低土壤有效磷的供应能力, 而植物残体的覆盖能够降低土壤容重, 降低土壤 pH 值, 同时增加土壤养分^[30]。本研究土壤有效磷与林下植被覆盖率无显著相关性, 可能与土壤磷元素除受植被影响外, 土壤中岩石也会矿化出磷元素有关。草本层盖度与土壤有机质和碱解氮呈正相关, 可能是因为草本层盖度增加, 使得林下植被生物量和地下浅层根系增加, 相较于乔灌木的枯枝落叶, 草本植物枯死个体更容易被分解、养分归还速率和归还量相对较高, 增加了土壤表层腐殖质厚度。而腐殖质是土壤有机质和氮素的重要自然来源。

总体上, 本研究不同林型间土壤理化性质无显著差异。舒媛媛等^[31]研究表明: 由于凋落物组成不同, 落叶人工林土壤碳、氮、磷含量显著高于常绿针叶纯林; 李宜浓等^[32]研究指出: 林型是影响凋落物组成的重要因素之一, 不同森林类型间凋落物组成明显不同。但黄锦学等^[33]研究表明: 在全国尺度上, 由于环境因素的影响, 亚热带和温带地区森林的树种组成对凋落物的分解没有显著影响。环境因素和人为干扰的影响可能是导致没有差异产生的原因。

不同龄组间, 0~10 cm 土层大龄组 AG4 组群落土壤电导率显著高于其他龄组, 可能是因为电导率不仅能反映土壤养分含量的高低, 更是反映盐分含量高低的指标。上海人工林大部分由农田转化而来, 人工林营造初期, 继承了先前农田积累的营养物质, 这可能是 AG1 龄组土壤养分含量高的原因之一。到了后期, 林分生长迅速, 养分消化量大, 导致营养元素降低, 等快速生长阶段结束, 到达稳定增长期, 土壤养分开始积累, 表现出增加趋势, 于是养分质量分数整体呈现出增加—减少—增加的趋势。碱解氮和有机质仅在 10~30 cm 土层表现出一定差异性, 可能是因为表层土壤受人为因素影响严重, 差异性减弱, 而深层土壤由于人工林发育时间短, 暂未受到影响。土壤有效磷在不同龄组和土层间未表现出规律性, 可能是因为部分磷来源于成土母质, 在生态系统中的物质循环不如氮素强烈。此外, 研究区土层深度、立地条件不同, 研究结果也可能存在差异。

5 结论

上海市人工林土壤整体表现容重偏高, 酸碱度偏碱, 养分含量相对缺乏, 尤其是土壤有机质和氮素的缺乏, 是限制上海人工林健康发展的重要因子。有机质与其他理化性质相关性较为普遍, 是影响土壤理化性质、改善土壤结构和提高土壤肥力的关键因子之一。受城市化和人类活动影响, 不同区域、不同发展阶段人工林土壤理化性质不同, 与群落间的相互作用与影响不能一概而论, 在对人工林进行管理时, 不能简单地依据前人或其他地区的研究结果做类比, 而应从实际情况出发, 制定相应的管理和养护措施。上海市林业管理部门可在林下种植绿肥和草本植物, 增加林下植被生物量, 在降低刈割、践踏、污染等人为干扰的同时, 适量人为增加经无害化处理的有机肥料, 快速提高土壤有机质。从人工林健康可持续发展的长远角度出发, 应考虑城市人工林的复杂性与差异性, 对森林土壤和实施连续定点监测, 针对不同类型林地制定相应的个性化管理措施, 实现人工林长效健康可持续发展。本研究在调查采样过程中, 更多地关注土壤与植物群落之间的相关性, 不可避免地疏漏了样地其他环境因素和人为干扰的影响。在高度城市化和人为干扰背景下, 对城市森林土壤的研究应在保证样本量的基础上, 尽可能详尽地对研究样点做较为全面与深入的调查。

6 参考文献

- [1] 田志慧, 蔡北溟, 达良俊. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(VIII): 上海乡土陆生草本植物分布特征及其在城市绿化中的应用前景[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011(4): 24 - 34.
TIAN Zhihui, CAI Beiming, DA Liangjun. Diversity, spatial pattern and dynamics of vegetation under urbanization in Shanghai(VIII): distribution of native terrestrial wild plants and their applications to urban greening in Shanghai [J]. J

- East China Norm Univ Nat Sci*, 2011(4): 24 – 34.
- [2] 杜虎, 曾馥平, 王克林, 等. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化[J]. 生态学报, 2014, **34**(10): 2712 – 2724.
- DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, *et al.* Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(10): 2712 – 2724.
- [3] 夏体渊, 段昌群, 张彩仙, 等. 桉树人工林与邻近区域群落土壤肥力研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2010, **32**(1): 118 – 123.
- XIA Ti yuan, DUAN Changqun, ZHANG Caixian, *et al.* A study on the soil fertility in eucalyptus robusta plantation and their adjacent vegetations [J]. *J Yunnan Univ Nat Sci*, 2010, **32**(1): 118 – 123.
- [4] CASTELLO J D, TEALE S A. *Forest Health: An Integrated Perspective* [M]. New York: Cambridge University Press, 2011: 163 – 195.
- [5] WINGFIELD M J, BROCKERHOFF E G, WINGFIELD B D, *et al.* Plant forest health: the need for a global strategy [J]. *Science*, 2015, **349**(6250): 832 – 836.
- [6] AKBAR M H, AHMED O H, JAMALUDDIN A S, *et al.* Differences in soil physical and chemical properties of rehabilitated and secondary forests [J]. *Am J Appl Sci*, 2010, **7**(9): 1200 – 1209.
- [7] 李聪. 不同林型对林下土壤理化性质与土壤细菌多样性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- LI Cong. *Soil Physical and Chemical Properties and Soil Bacterial Diversity in Various Forest Type of Urban Forest* [D]. Haerbin: Northeast Forest University, 2013.
- [8] SCHOENHOLTZ S H, MIEGROET H V, BURGER J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities [J]. *For Ecol Manage*, 2000, **138**(1/3): 335 – 356.
- [9] 王兵. 上海市森林生态连清体系监测布局与网络建设研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [10] 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.
- ZHANG Kaixuan, SHANG Kankan, DA Liangjun. Soil quality comprehensive assessment of different plant communities in Shanghai green belt [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2015, **39**(3): 71 – 77.
- [11] 刘为华, 张桂莲, 徐飞, 等. 上海城市森林土壤理化性质[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(2): 155 – 163.
- LIU Weihua, ZHANG Guilian, XU Fei, *et al.* Soil physical and chemical properties in Shanghai's urban forests [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(2): 155 – 163.
- [12] 李乃丹, 张庆费, 达良俊. 城市废弃工业区低干扰绿地植物群落的土壤特性[J]. 东北林业大学学报, 2008, **36**(12): 13 – 16.
- LI Naidan, ZHANG Qingfei, DA Liangjun. Soil properties under low-disturbed plant communities in urban abandoned industrial area [J]. *J Northeast For Univ*, 2008, **36**(12): 13 – 16.
- [13] XU Junli, JING Beibei, ZHANG Kaixuan, *et al.* Heavy metal contamination of soil and tree-ring in urban forest around highway in Shanghai, China [J]. *Hum Ecol Risk Assess An Int J*, 2017, **23**(7): 1745 – 1762.
- [14] 达良俊, 方和俊, 李艳艳. 上海中心城区绿地植物群落多样性诊断和协调性评价[J]. 中国园林, 2008, **24**(3): 87 – 90.
- DA Liangjun, FANG Hejun, LI Yanyan. Diversity analysis and harmony assessment on the plant community in green space of central Shanghai [J]. *Chin Landscape Archit*, 2008, **24**(3): 87 – 90.
- [15] 郭雪艳. 上海城市森林多尺度生态质量评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- GUO Xueyan. *Multi-Scale Assessments on Ecological Quality of Urban Forest in Shanghai, China* [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [16] 李秋艳, 朱海燕. 生态系统固碳观测与调查技术规范[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [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] 侯传庆. 上海土壤[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992: 261 – 262.
- [19] 廖红. 高级植物营养学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 148 – 152.
- [20] 于法展, 张忠启, 陈龙乾, 等. 庐山不同森林植被类型土壤特性及其健康评价[J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(7): 1062 – 1069.
- YU Fazhan, ZHANG Zhongqi, CHEN Longqian, *et al.* Soil characteristics and health assessment for different forest

- vegetation in Lushan [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2016, **25**(7): 1062 – 1069.
- [21] 方海兰. 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, 2014: 52.
- [22] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J]. 水土保持研究, 2015, **22**(3): 50 – 55.
- YANG Hao, HU Jiwei, HUANG Xianfei, *et al.* Study on soil fertility of *Rosa sterilis* S.D. Shi planting bases located in Karst areas [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2015, **22**(3): 50 – 55.
- [23] GUPTA R D, ARORA S, GUPTA G D, *et al.* Soil physical variability in relation to soil erodibility under different land uses in foothills of Siwaliks in N-W India [J]. *Trop Ecol*, 2010, **51**(2): 1183 – 1197.
- [24] 田稼, 孙超, 杨明琰, 等. 黄土高原不同树龄苹果园土壤微生物、养分及 pH 的相关性[J]. 西北农业学报, 2012, **21**(7): 138 – 141.
- TIAN Jia, SUN Chao, YANG Mingyan, *et al.* The correlation of soil microbes, soil nutrient and soil pH of different apple tree-age orchards in Loess Plateau [J]. *Acta Agric Boreal-Occident Sin*, 2012, **21**(7): 138 – 141.
- [25] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J]. 生态学报, 2017, **37**(2): 1 – 9.
- ZHANG Xiaoxia, YANG Zongru, ZHA Tonggang, *et al.* Changes in the physical properties of soil in forestlands after 22 years under the influence of the conversion of cropland into farmland project in loess region, Western Shanxi Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(2): 1 – 9.
- [26] 魏强, 凌雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4700 – 4713.
- WEI Qiang, LING Lei, CHAI Chunshan, *et al.* Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(15): 4700 – 4713.
- [27] OROZCO-ACEVES M, STANDISH R J, TIBBETT M. Soil conditioning and plant-soil feedbacks in a modified forest ecosystem are soil-context dependent [J]. *Plant Soil*, 2015, **390**(1/2): 183 – 194.
- [28] EDIRIWEERA S, SINGHAKUMARA B M P, ASHTON M S. Variation in canopy structure, light and soil nutrition across elevation of a Sri Lankan tropical rain forest [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **256**(6): 1339 – 1349.
- [29] 任庆水, 马朋, 李昌晓, 等. 三峡库区消落带落羽杉(*Taxodium distichum*)与柳树(*Salix matsudana*)人工植被对土壤营养元素含量的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(20): 6431 – 6444.
- REN Qingshui, MA Peng, LI Changxiao, *et al.* Effects of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* on the contents of nutrient elements in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **26**(20): 6431 – 6444.
- [30] 罗萌, 刘长海. 绿化植物废弃物对城市林地土壤微生物量和养分特性的影响[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(2): 223 – 232.
- LUO Meng, LIU Changhai. Effect of mulching greenery waste on soil nutrients and soil microbial biomass of municipal forest land [J]. *Ecol Environ Sci*, 2016, **25**(2): 223 – 232.
- [31] 舒媛媛, 黄俊胜, 赵高卷, 等. 青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(2): 394 – 402.
- SHU Yuanyuan, HUANG Junsheng, ZHAO Gaojuan, *et al.* Effects of afforestation with different tree species on soil enzyme activities and nutrient content in eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(2): 394 – 402.
- [32] 李宜浓, 周晓梅, 张乃莉, 等. 陆地生态系统混合凋落物分解研究进展[J]. 生态学报, 2016, **36**(16): 4977 – 4987.
- LI Yinong, ZHOU Xiaomei, ZHANG Naili, *et al.* The research of mixed litter effects on litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(16): 4977 – 4987.
- [33] 黄锦学, 黄李梅, 林智超, 等. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, **5**(3): 56 – 63.
- HUANG Jinxue, HUANG Limei, LIN Zhichao, *et al.* Controlling factors of litter decomposition rate in China's forests [J]. *J Subtrop Resour Environ*, 2010, **5**(3): 56 – 63.