

## 上海典型城市生态廊道的土壤真菌多样性

### Soil Fungal Diversity in the Typical Urban Ecological Corridors in Shanghai

韩继刚<sup>1,3</sup> 骆玉珍<sup>1</sup> 张维维<sup>1,2\*</sup>  
HAN Jigang<sup>1,3</sup> LUO Yuzhen<sup>1</sup> ZHANG Weiwei<sup>1,2\*</sup>

(1.上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 2.东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 秦皇岛 066004; 3.上海市野生动植物和自然保护地研究中心, 上海 202162)

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai, China, 200232; 2. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei, China, 066004; 3. Shanghai Wildlife and Protected Natural Areas Research Center, Shanghai, China, 202162)

文章编号: 1000-0283(2024)04-0034-08  
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2024. 04. 0034. 005  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2024-01-15  
修回日期: 2024-03-05

#### 摘 要

公园绿地和道路绿地是城市生态廊道的典型形式。选择上海公园绿地和道路绿地作为研究对象, 采用高通量测序技术分析其真菌多样性特征。结果表明, 上海典型城市生态廊道土壤中共有9大类群真菌, 其中Ascomycota(子囊菌门)、Basidiomycota(担子菌门)和Zygomycota(结合菌门)是上海典型城市生态廊道土壤中的优势真菌, 其相对丰度分别达到59.5%、14.9%和14.2%。上海典型城市生态廊道土壤中的植物病原真菌共有91个属, 144个种水平类群; 土传病原真菌有48个属, 35个种水平类群, *Fusarium*是属水平上丰度最高的病原真菌, *Fusarium solani*相近类群是种水平上丰度最高的病原真菌。公园和道路绿地土壤真菌群落以及病原真菌群落间存在显著性差异。*Mortierella*、*Talaromyces*、*Guehomyces*、*Trichobotrys*、*Metarhizium*、*Mycarachis*、*Cystofilobasidium*、*Penicillium*、*Gibberella*、*Curvularia*等菌群在公园绿地和道路绿地中存在显著差异。pH、EC、全钾、有效钾、交换性钠、全铅和全铜是影响土传植物病原真菌群落组成的主要因子。

#### 关键词

城市廊道; 公园绿地; 道路绿地; 真菌; 多样性

#### Abstract

Park green spaces and road green spaces are typical forms of urban ecological corridors. Park green spaces and road green spaces in Shanghai were selected as research objects. High-throughput sequencing technology was used to analyze soil fungal diversity characteristics. The results showed that there were nine major fungal groups in the soil of typical urban ecological corridors in Shanghai, among which Ascomycota, Basidiomycota, and Zygomycota were the dominant fungi in the soil of typical urban ecological corridors in Shanghai, with relative abundances of 59.5%, 14.9%, and 14.2%, respectively. There were 91 genera and 144 species or groups at the species level of plant pathogenic fungi in the soil of typical urban ecological corridors in Shanghai. There were 48 genera and 35 species or groups at the species level of soil-borne pathogenic fungi, with *Fusarium* being the most abundant pathogenic fungi at the genus level and *Fusarium solani* being the most abundant pathogenic fungi at the species level or closely related groups at the species level, respectively. There were significant differences in soil fungal communities and pathogenic fungal communities between park and road green spaces. There were substantial differences in the microbial communities of *Mortierella*, *Talaromyces*, *Guehomyces*, *Trichobotrys*, *Metarhizium*, *Mycarachis*, *Cystofilobasidium*, *Penicillium*, *Gibberella*, and *Curvularia* between park and road green spaces. Soil pH, EC, total potassium, available potassium, exchangeable sodium, total lead, and total copper were the main factors affecting the composition of soil-borne plant pathogenic fungal communities.

#### Keywords

urban ecological corridor; park green space; road green space; fungi; diversity

#### 韩继刚

1970年生/男/河北保定人/博士/教授/研究方向为城市绿地土壤质量监测和植物根际促生细菌资源及其应用

#### 张维维

1986年生/女/河北秦皇岛人/博士/讲师、硕士生导师/研究方向为土壤微生物生态学

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: 55779620@qq.com

基金项目:  
上海市绿化和市容管理局项目“城市绿化土壤生物活性评价方法的建立和应用”(编号: G200201)

城市生态廊道是城市绿地系统的重要组成部分,在城市生态系统中发挥着至关重要的生态服务功能,如改善城市环境质量,保护城市生物多样性,为城市居民提供更好的生活环境及休憩场所等<sup>[1-2]</sup>。近些年来,世界各国越来越重视城市生态廊道的研究及建设,以期通过建设城市生态廊道的方式来提升城市生态环境质量,改善城市生态安全格局,应对城市快速发展带来的各种环境问题<sup>[3-4]</sup>。目前,对城市生态廊道的研究大多集中在景观层面,例如探讨如何通过增加廊道连通度、面积、异质性等提升廊道生态功能<sup>[5]</sup>。然而,对于城市生态廊道建设如何影响土壤质量特别是土壤生物群落,则鲜有报道和研究。

土壤质量对于城市生态廊道功能的正常发挥具有重要作用,而土壤健康是构成土壤质量的重要部分。健康的土壤通常被定义为具有高水平生物多样性、生物活动、内部营养循环和抗干扰能力的稳定土壤系统<sup>[6]</sup>。城市绿地土壤健康能够维持绿地系统稳定,是保障植物健康,促进可持续发展的基础。其中,土壤微生物在保障绿地土壤健康方面起着至关重要的作用,城市绿地系统土壤微生物不仅参与土壤养分循环,更在土壤净化、气候变化调节等方面作用重大<sup>[7]</sup>。但是,Wang等<sup>[8]</sup>研究发现,城市草地土壤微生物 $\alpha$ 多样性显著低于郊区草地和农村农田土壤。此外,有研究表明,土壤微生物多样性对人类健康也存在重要影响,例如,城市绿地土壤生物多样性高,可在一定程度上减少城市居民中与人体免疫功能受损相关的慢性病<sup>[9]</sup>。

绿地土壤微生物种类丰富、数量极大,其中,土壤中的病原菌是生态系统的一种不稳定因素,对土壤生态系统健康具有非常

重要的影响。在土壤中的诸多病原菌中,土传病原菌是一类以土壤为传播媒介的植物致病菌,主要为土传病原细菌、真菌或病毒。植物由于直接从土壤中获取营养物质,较易受到土传病原菌感染而发病。因此土传病原菌对植物健康生长存在严重威胁。据文献报道,在众多的植物病原菌中,*Fusarium oxysporum* (尖孢镰刀菌)、*Fusarium solani* (腐皮镰刀菌)、*Sclerotium rolfsii* (齐整小核菌)等土传植物病原真菌是造成植物生长障碍的主要病原菌<sup>[10]</sup>。但是,目前对城市生态廊道,特别是对上海这种特大型城市生态廊道土传病原菌的研究仍比较缺乏。

因此,为全面了解城市绿地土壤真菌及土传植物病原真菌,阐明城市生态廊道建设对土壤真菌及土传植物病原真菌的影响,文章通过高通量测序的方法系统分析了上海两种典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中真菌和土传植物病原真菌的群落组成,结合土壤理化性质分析,初步确定了影响土传植物病原真菌分布的土壤理化因素。研究结果为城市生态廊道土传病害的监测和防治提供了依据,同时也为城市生态廊道土壤质量的进一步提升奠定了基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集

在上海市16个行政区的公园绿地和道路绿地中设置采样点,采集0~20 cm表层土壤样品。采样点尽可能覆盖各行政区内不同大小公园内的绿地以及城市主干道旁的道路绿地。样品采集使用混合采样法。公园绿地土壤样品的采集采用S型采样法,根据采样点绿化面积大小,由8~12个取样点混为一个样品;道路绿地采用等间距采样法,5个取样点混为一个样品。本研究共采集120个土

壤样品,包括公园绿地土壤样品和道路绿地土壤样品各60个(表1)。

### 1.2 土壤样品预处理

混合采样时,每份0~20 cm表层土壤混合样品共采集2~3 kg,装于无菌密封袋中,4℃运输至实验室,去除土壤中的树枝、石块、草根等杂物,使用四分法将样品混合均匀,置于4℃冰箱和-20℃冰箱保存,用于后续实验处理。

### 1.3 土壤理化性质分析

根据表2所列的检测方法和仪器设备<sup>[11-16]</sup>,测定绿地土壤样品理化性质。

### 1.4 土壤真菌群落组成测定

#### 1.4.1 土壤DNA的提取

新鲜土壤样品过2 mm筛,按照FastDNA spin kit for soil试剂盒(MP,美国)说明书提取120份土壤样品总DNA,洗脱体积为100  $\mu$ L。使用NanoDrop 2000微量分光光度计和1%琼脂糖凝胶电泳(电压:5 V/cm,时间:20 min)对提取后的DNA进行质量检测,做好标记后存入-80℃冰箱。

#### 1.4.2 土壤样品高通量测序

使用ITS1F/ITS2R引物(ITS1F, 5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3'; ITS2R, 5'-GCTGCGTTCCTCATC GATGC-3')扩增土壤真菌ITS区<sup>[17]</sup>,ITS1F引物5'端带有10 bp的barcode用于区分样品,扩增产物大小400 bp左右。PCR反应体系使用TransGen AP221-02(TransGen,北京)试剂盒配制,反应体系为:5×FastPfu Buffer 4  $\mu$ L, 2.5 mM dNTPs 2  $\mu$ L, FastPfu Polymerase 0.4  $\mu$ L,正向引物和反向引物(0.5  $\mu$ M)各0.8  $\mu$ L,土壤DNA 10 ng,加水补足20  $\mu$ L。PCR反应条件为:预变性

表1 各行政区公园绿地和道路绿地样品数量  
Tab. 1 The number of park and road green space soil samples in each district

| 行政区<br>District | 公园绿地<br>Park green space |                | 道路绿地<br>Road green space |                | 总计<br>Total |
|-----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|-------------|
|                 | 公园名称<br>Park name        | 点位个数<br>Number | 道路名称<br>Road name        | 点位个数<br>Number |             |
| 静安区             | 大宁郁金香公园                  | 2              | 中山北路                     | 2              | 4           |
|                 | 静安雕塑公园                   | 2              | 延安中路                     | 2              | 4           |
| 徐汇区             | 植物园                      | 2              | 肇家浜路                     | 2              | 4           |
|                 | 东安公园                     | 2              | 虹梅路                      | 2              | 4           |
| 黄浦区             | 广场公园                     | 2              | 重庆南路                     | 2              | 4           |
|                 | 复兴公园                     | 2              | 成都北路                     | 2              | 4           |
| 杨浦区             | 四平科技公园                   | 2              | 殷行路                      | 2              | 4           |
|                 | 共青森林公园                   | 2              | 黄兴路                      | 2              | 4           |
| 普陀区             | 长风公园                     | 2              | 梅川路                      | 2              | 4           |
|                 | 未来岛公园                    | 2              | 祁连山路                     | 2              | 4           |
| 长宁区             | 新虹桥中心花园                  | 1              | 延安西路                     | 2              | 3           |
|                 | 中山公园                     | 2              | 长宁路                      | 2              | 4           |
| 虹口区             | 和平公园                     | 2              | 内环高架路                    | 1              | 3           |
|                 | 鲁迅公园                     | 2              | 场中路                      | 2              | 4           |
| 浦东新区            | 世纪公园                     | 2              | 杨高中路                     | 2              | 4           |
|                 | 华夏公园                     | 2              | 龙东大道                     | 2              | 4           |
| 宝山区             | 顾村公园                     | 2              | 外环高速                     | 2              | 4           |
|                 | 炮台湾湿地公园                  | 2              | 蕰川公路                     | 2              | 4           |
| 闵行区             | 航华公园                     | 2              | 剑川路                      | 1              | 3           |
|                 | 华漕公园                     | 1              | 光华路                      | 2              | 3           |
| 松江区             | 辰山植物园                    | 2              | 沪松公路                     | 2              | 4           |
|                 | 佘山国家森林公园                 | 2              | 沈砖公路                     | 2              | 4           |
| 嘉定区             | 马陆公园                     | 2              | 浏翔公路                     | 2              | 4           |
|                 | 黄渡公园                     | 2              | 墨玉北路                     | 2              | 4           |
| 金山区             | 张堰公园                     | 2              | 金山工业区大道                  | 2              | 4           |
|                 | 亭林公园                     | 2              | 漕廊公路                     | 2              | 4           |
| 奉贤区             | 奉浦四季生态园                  | 1              | 新奉公路                     | 2              | 3           |
|                 | 海湾国家森林公园                 | 2              | 望园南路                     | 1              | 3           |
| 青浦区             | 大观园                      | 2              | 商周公路                     | 2              | 4           |
|                 | 曲水园                      | 1              | 朱枫公路                     | 1              | 2           |
| 崇明区             | 崇明新城公园                   | 2              | 陈海公路                     | 2              | 4           |
|                 | 东平森林公园                   | 2              | 小星公路                     | 2              | 4           |

95℃, 5 min。随后进入35个循环: 94℃, 1 min; 51℃, 1 min; 72℃, 1 min; 最后延伸72℃, 10 min。

PCR产物进行2%的凝胶电泳检测, 然后将目的条带通过AxyPrep DNA凝胶回收试剂

盒(Axygen, 美国)回收, 洗脱液为Tris-HCl缓冲液。之后使用QuantiFluor™-ST蓝色荧光定量系统对PCR产物进行检测定量, 构建Miseq文库。随后在Illumina PE300平台进行测序(上海美吉生物有限公司)。

1.5 数据统计分析

下机数据经过Trimmomatic软件清洗, 获得高质量序列。根据Lu等<sup>[18]</sup>的方法进行OTU聚类分析, 序列相似性≥97%视为同一OTU, 在NCBI数据库中进行OTU代表序列比对, 根据亲缘关系最近的真菌序列, 推断OTU分类地位。利用FUNGuild软件划分真菌功能类群, 获得上海典型城市生态廊道土壤中所含的潜在植物病原真菌属、种水平信息<sup>[19]</sup>。将植物病原真菌种、属信息进一步与已发表文献比对, 确定土壤中存在的土传植物病原真菌的属、种组成信息。

将样品按照公园绿地和道路绿地进行分组, 使用PERMANOVA分析(Bonferroni校正)绿地类型对真菌、植物病原真菌和土传病原真菌群落组成的影响; 利用R的stats数据包, 使用Wilcox秩和检验(fdr校正)分析不同类型绿地植物病原真菌和土传病原真菌属水平的物种差异; 最后采用CANOCO 5的CCA分析功能分析土壤理化因子对土传植物病原真菌属水平相对丰度的影响<sup>[20]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质

土壤样品的理化性质如表3所示。土壤中含水率、pH值、EC值、有机质、全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、有效钾、有效硫、交换性钠、有效氯、全铬、全镍、全铜、全锌、全砷和全铅的含量范围分别是: 7.0% ~ 30.4%、5.3 ~ 8.8、21.0 ~ 5 580.0 μs/cm、6.7 ~ 72.9 g/kg、0.3 ~ 3.0 g/kg、0.3 ~ 3.0 g/kg、14.1 ~ 25.2 g/kg、4.0 ~ 594.0 mg/kg、0.8 ~ 130.0 mg/kg、28.2 ~ 622.0 mg/kg、9.9 ~ 4 407.0 mg/kg、3.2 ~ 4 186.0 mg/L、0.8 ~ 5 182.0 mg/L、30.7 ~ 132.0 mg/kg、13.2 ~ 95.3 mg/kg、14.6 ~ 86.5 mg/kg、69.8 ~ 731.0 mg/kg、

表2 土壤样品理化性质的检测方法  
Tab. 2 Determination methods of soil physicochemical properties

| 理化性质<br>Physicochemical properties | 检测方法<br>Determination methods | 仪器设备<br>Instrumentations                 |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| 含水率 (RWC)                          | 环刀法                           | 烘箱                                       |
| pH                                 | 电位法                           | pH 计 (XL600, Fisher scientific)          |
| EC                                 | 电导法                           | 电导仪                                      |
| 有机质 (SOM)                          | 重铬酸钾氧化 – 外加加热法                | 超级恒温槽                                    |
| 全氮 (TN)                            | 凯氏定氮法                         | 全自动定氮仪                                   |
| 有效氮 (AN)                           | 碱解 – 扩散法                      | 恒温箱                                      |
| 全磷 (TP)                            | NaOH 熔解法                      | 紫外 – 可见分光光度计 (PE lambda25, Perkin Elmer) |
| 全钾 (TK)                            | NaOH 熔解法                      | 原子吸收分光光度计 (PE AA-800, Perkin Elmer)      |
| 有效磷 (AP)                           | AB-DTPA 浸提法                   | ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)           |
| 有效钾 (AK)                           | AB-DTPA 浸提法                   | ICP-OES (PE 8300DV, Perkin Elmer)        |
| 有效硫 (AS)                           | AB-DTPA 浸提法                   | ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)           |
| 有效氯 (Cl)                           | 水饱和浸提 / 硝酸盐滴定法                | –                                        |
| 交换性钠 (eNa)                         | 水饱和浸提法                        | ICP-OES (PE 8300DV, Perkin Elmer)        |
| 全砷 (As)                            | 原子荧光法                         | 原子荧光光度计 (AFS-9700, 海光)                   |
| 全铜 (Cu)                            | 全消解法                          | ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)           |
| 全锌 (Zn)                            | 全消解法                          | ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)           |
| 全铅 (Pb)                            | 全消解法                          | ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)           |
| 全铬 (Cr)                            | 全消解法                          | ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)           |
| 全镍 (Ni)                            | 全消解法                          | ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)           |

表3 上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地的土壤理化性质  
Tab. 3 Soil physicochemical properties of typical urban ecological corridors in Shanghai

| 理化性质<br>Physicochemical properties | 公园绿地<br>Park green space | 道路绿地<br>Road green space | 变异系数 / %<br>Coefficients of variation |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| RWC / %                            | 17.0 ± 3.8 a             | 16.3 ± 3.5 a             | 22.1                                  |
| pH 值                               | 7.8 ± 0.4 a              | 7.8 ± 0.5 a              | 5.9                                   |
| EC 值 / (μs/cm)                     | 134.0 ± 42.1 a           | 293.0 ± 702.0 b          | 199.0                                 |
| SOM / (g/kg)                       | 26.0 ± 12.0 a            | 22.9 ± 8.4 a             | 44.8                                  |
| TN / (g/kg)                        | 1.3 ± 0.4 a              | 1.1 ± 0.4 a              | 34.4                                  |
| TP / (g/kg)                        | 0.9 ± 0.4 a              | 0.9 ± 0.4 a              | 40.6                                  |
| TK / (g/kg)                        | 18.7 ± 1.6 a             | 18.8 ± 1.4 a             | 8.2                                   |
| AN / (mg/kg)                       | 89.5 ± 37.1 a            | 106.0 ± 90.0 b           | 57.7                                  |
| AP / (mg/kg)                       | 10.6 ± 13.9 a            | 13.1 ± 14.2 a            | 126.0                                 |
| AK / (mg/kg)                       | 127.0 ± 52.5 a           | 172.0 ± 95.0 b           | 48.9                                  |
| AS / (mg/kg)                       | 18.1 ± 11.5 a            | 189.0 ± 586.0 b          | 506.0                                 |
| eNa / (mg/L)                       | 15.6 ± 30.4 a            | 203.0 ± 582.0 b          | 498.0                                 |
| Cl / (mg/L)                        | 26.9 ± 43.9 a            | 190.0 ± 658.0 b          | 504.0                                 |
| Cr / (mg/kg)                       | 76.9 ± 11.8 a            | 77.4 ± 7.8 a             | 14.3                                  |
| Ni / (mg/kg)                       | 32.3 ± 5.4 a             | 32.3 ± 4.5 a             | 17.2                                  |
| Cu / (mg/kg)                       | 31.4 ± 10.9 a            | 31.2 ± 9.1 a             | 33.6                                  |
| Zn / (mg/kg)                       | 120.0 ± 54.0 a           | 125.0 ± 33.4 a           | 41.5                                  |
| As / (mg/kg)                       | 7.1 ± 1.4 a              | 7.7 ± 4.8 b              | 35.7                                  |
| Pb / (mg/kg)                       | 33.0 ± 14.0 a            | 33.1 ± 11.4 a            | 40.8                                  |

注：表中不同字母表示具有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

4.0 ~ 41.2 mg/kg 和 17.2 ~ 113.0 mg/kg。其中，道路绿地土壤EC值、有效氮、有效钾、有效硫、交换性钠、有效氯和全砷含量显著高于公园绿地 ( $p < 0.05$ )；不同绿地类型土壤含水率、pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、全铬、全镍、全铜、全锌和全铅的含量无显著性差异。

比较各个土壤理化因子间的变异系数，发现EC值、有效磷、有效硫、交换性钠和有效氯的变异系数均超出100%，属于强变异，表明这5种土壤因子数据比较离散，不同样品间的差异较大。含水率、有机质、全氮、全磷、有效氮、有效钾以及全铬、全铅、全砷、全铜、全锌和全镍的变异系数在14.3% ~ 48.9%，属于中等程度变异，说明不同采样点间的数据相对分散；pH值和全钾的变异系数分别为5.9%和8.2%，小于10%，属于弱变异，说明pH值和全钾的含量在上海市绿地土壤中的分布较为均匀。

2.2 土壤真菌多样性分布特征

高通量测序得到7 112 472条真菌ITS有效序列，每个样本的有效序列为59 272 ± 3 388条。序列分析表明，上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤的真菌类群包括Ascomycota (子囊菌门)、Basidiomycota (担子菌门)、Zygomycota (接合菌门)、Rozellomycota (类原生动物门)、Glomeromycota (球囊菌门)、Chytridiomycota (壶菌门)、Blastocladiomycota (芽枝霉门)等。其中，Ascomycota、Basidiomycota和Zygomycota是土壤中的优势真菌类群，相对丰度分别为59.5%、14.9%和14.2% (表4)。除Ascomycota、Zygomycota相对丰度变异系数小于100%外，其余真菌类群相对丰度的变异系数都高于100%，尤其是Blastocladiomycota和Rozellomycota两类真菌，说明不同土壤样品中

的真菌群落组成差异很大。

PERMANOVA 分析结果表明, 公园绿地和道路绿地土壤真菌群落存在显著差异 ( $F=3.97$ ,  $R^2=0.013$ ,  $p=0.001$ )。Wilcoxon 秩和检验结果表明, 公园绿地土壤中 *Mortierella* (被孢霉属)、*Talaromyces* (踝节菌属)、*Guehomyces*、*Trichobotrys*、*Metarhizium* (绿僵菌属)、*Mycoarachis*、*Cystofilobasidium* 等菌群丰度显著高于道路绿地 ( $p<0.05$ ); *Penicillium* (青霉菌属)、*Gibberella* (赤霉菌属)、*Curvularia* (弯孢属) 等菌群相对丰度在道路绿地土壤中显著增高 ( $p<0.05$ ) (图1)。

2.3 土壤植物病原真菌多样性分布特征

2.3.1 植物病原真菌群落组成

FUNGuild 分类结果表明, 上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中的植物病原真菌共有 91 个属, 144 个种或者种水平类群。平均每个样品中有  $34\pm7$  个属,  $28\pm8$  个种或者种水平类群; 病原真菌含量最高的样品有 53 个属, 54 种或者种水平类群, 最少的有 11 个属, 5 个种或者种水平类群 (表5)。

在属水平上, *Fusarium*、*Volutella* (周刺座霉属)、*Acremonium* (支顶孢属)、*Clonostachys* (粘帚霉属)、*Gibberella* (赤霉菌属)、*Monographella* (小画线壳属)、*Gibellulopsis* 等是绿地土壤优势病原真菌属, 占植物病原真菌总 OTU 的比例分别为 35.5%、6.1%、5.0%、4.9%、4.8%、4.1% 和 2.9%。其中, *Fusarium* 是相对丰度和检出率最高的潜在植物病原真菌, 占比达到 4.3%, 检出率为 100%, 其余 6 个植物病原真菌属的检出率分别为 95.2%、98.1%、95.5%、92.9%、96.8% 和 92.6%。在这些优势属中, *Fusarium* 主要危害金线菊、蓝眼菊等植物, 引起其枯萎病; *Volutella* 可以侵染黄杨等林木, 是造成其枯萎病的主要病原菌之一<sup>[21]</sup>; *Clonostachys* 是造成植物灰霉病<sup>[22]</sup> 的病原菌之一; *Gibberella* 危

表4 上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤主要真菌类群相对丰度 (门水平)  
Tab. 4 The relative abundance of fungi in the soil of typical urban ecological corridors in Shanghai (at phylum level)

| 真菌类群<br>Fungal group | 最小值/%<br>Minimum | 最大值/%<br>Maximum | 平均值/%<br>Average | 标准偏差/%<br>Standard deviation | 变异系数/%<br>Coefficients of variation |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Ascomycota           | 10.4             | 96.3             | 59.5             | 18.4                         | 31                                  |
| Basidiomycota        | 0.5              | 84.8             | 14.9             | 15.6                         | 104                                 |
| Zygomycota           | 0.3              | 64.6             | 14.2             | 11.9                         | 83.5                                |
| Rozellomycota        | 0                | 15.5             | 0.5              | 1.7                          | 314                                 |
| Chytridiomycota      | 0                | 2.6              | 0.2              | 0.3                          | 189                                 |
| Glomeromycota        | 0                | 3.4              | 0.1              | 0.3                          | 273                                 |
| Blastocladiomycota   | 0                | 0.3              | 0                | 0                            | 678                                 |

表5 上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中病原真菌属、种水平类群统计分析  
Tab. 5 Statistical analysis of pathogenic fungi in the soil of typical urban ecological corridors in Shanghai at genus and species level

| 真菌类群<br>Fungal group | 最大值/个<br>Maximum | 最小值/个<br>Minimum | 平均值/个<br>Average | 标准偏差<br>Standard deviation | 总计/个<br>Total |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------|---------------|
| 植物病原真菌 (属)           | 53               | 11               | 34               | 7                          | 91            |
| 植物病原真菌 (种水平类群)       | 54               | 5                | 28               | 8                          | 144           |
| 土传植物病原真菌 (属)         | 27               | 6                | 15               | 3                          | 48            |
| 土传植物病原真菌 (种水平类群)     | 17               | 1                | 6                | 3                          | 35            |

害风信子等园林植物, 造成植株干腐病<sup>[23]</sup>; *Monographella* 是引起植物叶斑病的病原菌之一<sup>[24]</sup>; *Gibellulopsis* 则可以引起植物枯萎病<sup>[25]</sup>。

在种水平上, 与 *Fusarium solani* (腐皮镰刀菌)、*Monographella cucumerina* (烟草镰刀菌)、*Clonostachys rosea* (粉红粘帚霉)、*Gibellulopsis nigrescens* (变黑轮枝菌) 和 *Acremonium alternatum* (互生顶孢霉) 相近的类群相对丰度最高, 分别为 26.1%、9.7%、9.4%、6.1%、5.6%。在样品中的检出率分别为 100%、92.6%、93.6%、92.6% 和 83%。除此之外, 与 *Myrothecium verrucaria* (疣孢漆斑菌)、*Rhizopycnis vagum* (根盘菌)、*Thermomyces lanuginosus* (嗜热真菌)、*Stachybotrys dichroa* (二色葡萄穗霉) 和 *Acremonium polychromum* 相近的类群也是上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中相对丰度较高 (高于 1.5%) 的植物病原真菌, 除与 *S. dichroa* 相近

类群外, 在样品中的检出率都超过了 48.0%。其中, *F. solani* 可以侵染槐树、橄榄树等多种园林植物, 导致植物枯萎病、根腐病等多种病害<sup>[26]</sup>; *R. vagum* 可以侵染植物的根部, 造成根部坏死<sup>[27]</sup>。

2.3.2 土壤植物病原真菌多样性

PERMANOVA 分析表明, 公园绿地和道路绿地土壤中的植物病原真菌属群落存在显著性差异 ( $F$  值 = 4.17,  $R^2=0.013$ ,  $p=0.001$ )。Wilcoxon 秩和检验分析发现, *Didymosphaeria* (隔孢球壳属)、*Thermomyces* (嗜热真菌属)、*Colletotrichum* (刺盘孢属)、*Massarina* (透孢黑团壳属)、*Coniothyrium* (盾壳霉)、*Phialophora* (瓶霉属)、*Chalara* (鞘孢属) 等菌群在公园绿地中的相对丰度显著高于道路绿地, *Cladosporium* (枝孢属) 的相对丰度在道路绿地中显著增高 ( $p<0.05$ ) (图2)。



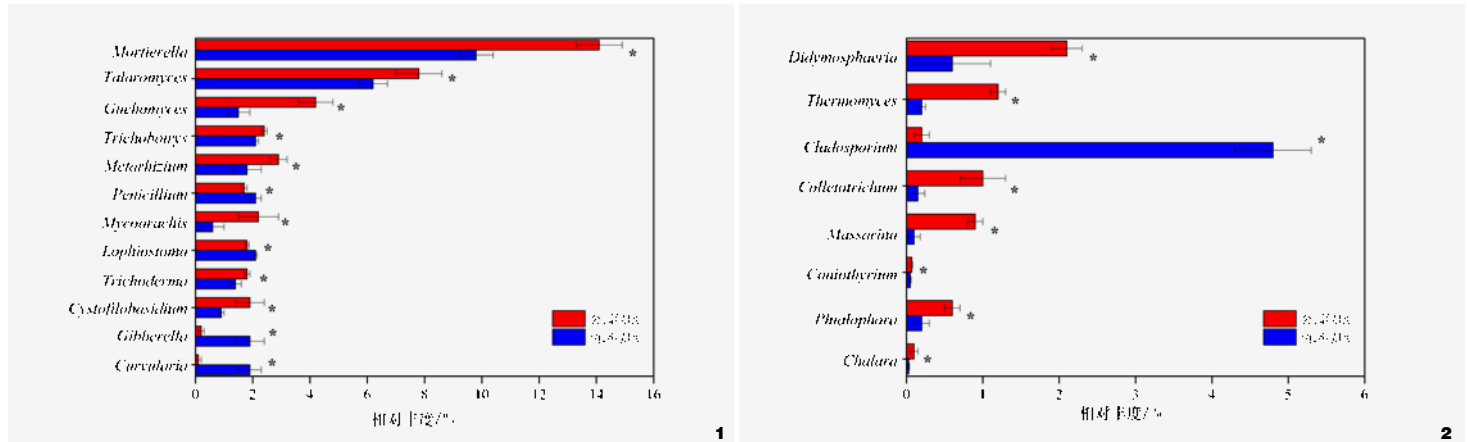


图1 上海公园绿地和道路绿地土壤中真菌物种差异分析 (属水平)  
Fig. 1 Variance analysis of soil fungi in Shanghai park and road green space (at genus level)

图2 公园绿地和道路绿地土壤植物病原真菌物种差异分析 (属水平)  
Fig. 2 Variance analysis of plant pathogenic fungi in park and road green space soil (at genus level)

## 2.4 土壤土传植物病原真菌多样性分布特征

### 2.4.1 土传植物病原真菌群落组成

分析结果显示, 上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中土传病原真菌有48个属, 35个种或者种水平类群, 平均每个样品中有 $15 \pm 3$ 个属,  $6 \pm 3$ 个种或者种水平类群。多样性最高的土壤样品中存在27个属, 最低的存在6个属; 每个样品中至少含有一个种水平类群 (表5)。

在属水平上, *Fusarium* (镰刀菌属)、*Aspergillus* (曲霉属)、*Acremonium* (支顶孢属)、*Gibberella* (赤霉菌属)、*Curvularia* (弯孢属)、*Alternaria* (链格孢属)、*Periconia* (黑团孢属)、*Phoma* (茎点霉属)、*Pyrenochaeta* (棘壳孢属) 和 *Pestalotiopsis* (拟盘多毛孢属) 相对丰度最高, 分别达到49.1%、18.3%、7.4%、6.5%、3.1%、2.4%、2.2%、1.9%、1.8%和1.5%, 检出率分别为100%、99.7%、98.7%、93.2%、67.5%、83.0%、71.4%、87.5%、82.3%和83%。

在种水平上, 与 *Fusarium solani* (腐皮镰刀菌)、*Gibberella nigrescens*、*Acremonium alternatum* (支顶孢菌)、*Nectria ramulariae*、*Corynespora cassicola* (多

主棒孢菌) 和 *Phoma multirostrata* (多喙茎点霉) 相近的类群相对丰度最高, 分别达到64.7%、15.0%、12.4%、2.1%、1.0%和1.0%, 检出率分别为100.0%、92.6%、83.0%、61.7%、24.4%和35.1%。

### 2.4.2 土传植物病原真菌多样性

PERMANOVA分析表明, 公园绿地和道路绿地土壤土传植物病原真菌群落存在显著差异 ( $F$ 值=4.55,  $R^2=0.014$ ,  $p=0.002$ )。Wilcoxon秩和检验分析表明, *Helminthosporium* (长蠕孢霉属)、*Coniothyrium* (盾壳霉属)、*Fusarium* (镰刀菌属)、*Rhizopus* (根霉属)、*Aspergillus* (曲霉属)、*Chalara* (鞘孢属)、*Pyrenochaeta* (棘壳孢属)、*Thanatephorus* (亡革菌属)、*Ganoderma* (灵芝属) 在公园绿地土壤中的相对丰度显著高于道路绿地; *Cladosporium* (枝孢属) 在道路绿地土壤中的相对丰度显著高于公园绿地 ( $p < 0.05$ )。

### 2.4.3 土传植物病原真菌组成与土壤理化性质相关性分析

将土传植物病原真菌与19个土壤理化指

标进行CCA分析, 结果表明pH值、EC值、全钾、有效钾、交换性钠、全铜和全铅可解释所有变量的38.6%, 土壤理化性质与土传植物病原真菌组成的相关性较好。在CCA分析中, 土壤理化性质向量与群落组成或土壤样品间夹角的余弦值表示两者间的相关系数, CCA结果表明, *Acremonium*、*Alternaria*与EC值和交换性钠呈显著正相关关系, 说明土壤EC值和交换性钠对 *Acremonium* 和 *Alternaria* 的相对丰度影响较大; *Aspergillus*、*Pyrenochaeta*与全铜、全铅呈显著正相关关系, 说明土壤全铜、全铅对 *Aspergillus* 和 *Pyrenochaeta* 的相对丰度影响较大; *Periconia*与土壤全钾呈显著正相关关系, 说明土壤全钾对 *Periconia* 的相对丰度影响较大; *Curvularia*、*Arthrinium*与土壤pH呈显著正相关关系, 说明土壤pH值对 *Curvularia*、*Arthrinium* 的相对丰度影响较大 ( $p < 0.05$ ) (图3-a)。另外, 公园绿地和道路绿地土壤土传病原真菌与土壤pH、有效钾和全铜相关性最强, 表明土壤pH值、全钾、全铜和全铅可能是造成公园和道路绿地中土传植物病原真菌群落差异的主要因素 (图3-b)。

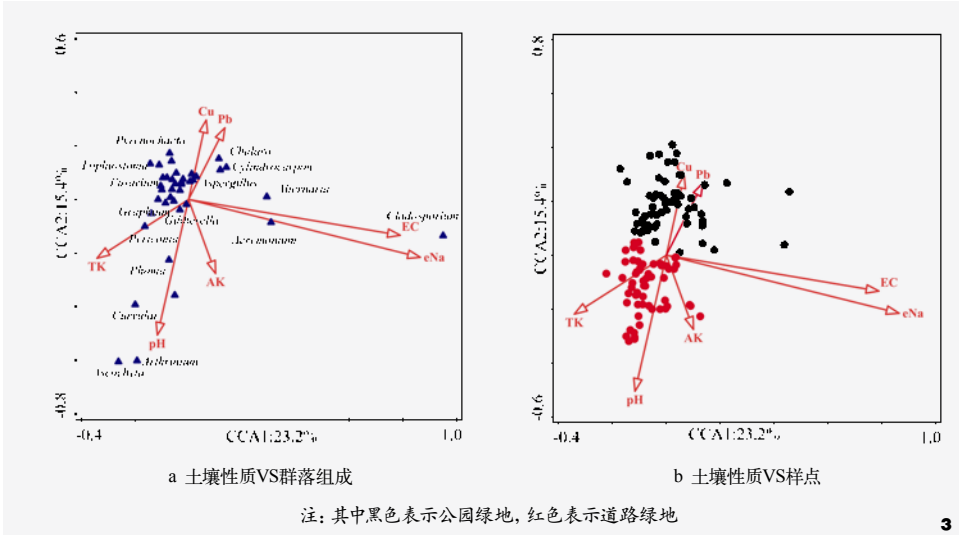


图3 上海公园绿地和道路绿地土传植物病原真菌与土壤性质的CCA图（属水平）  
Fig. 3 CCA diagram of soil-borne plant pathogenic fungi and soil properties in Shanghai park and road green space (at genus level)

### 3 讨论

本研究发现，上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤的真菌群落、病原真菌群落均存在显著差异，表明城市人为活动对城市生态廊道土壤真菌和病原真菌的多样性存在显著影响。Zhang等<sup>[28]</sup>的研究发现，由于人为活动的影响，中国亚热带雨林自然森林中的杜鹃花 (*Rhododendron ovatum*) 根系的真菌群落与种植园中的真菌群落存在着显著的不同；Prasetyo和Aeny<sup>[29]</sup>研究印度尼西亚的Lampung地区中种植不同植物的林地土壤中土传病原真菌的群落结构时，发现不同的林地土壤中土传病原真菌的群落结构存在很大的差异；Oehl<sup>[30]</sup>的研究中发现草地和耕地这两种土壤类型和不同的土地利用的强度可以改变丛枝菌根的真菌群落结构，上述研究均说明人为活动是影响土壤真菌、丛枝菌根以及土传病原真菌的多样性的一个重要因素。本研究结果进一步证实，在城市生态系统中，人为活动会显著影响土壤真菌和病原真菌的群落组成。

除人为活动外，土壤中的真菌多样性还受到很多因素的影响，包括土壤理化因子、土地利用方式、植物和气候等。Zhao等<sup>[31]</sup>比较了中心城区—近郊—远郊森林土壤中的真菌数量，发现城市化梯度可能会推动土壤理化性质的变化进而影响到真菌数量，Newbound等<sup>[32]</sup>发现是土壤性质而非城市—郊区的城市梯度对土壤真菌群落产生影响，Lauber等<sup>[33]</sup>研究耕地、阔叶林、松林和草地4种类型土壤中真菌结构时发现土壤性质可能比土壤利用方式对真菌的群落结构影响更大。因此，研究对影响土传植物病原真菌的土壤理化因子进行了分析，发现土壤pH值、EC值、全钾、有效钾、交换性钠、全铜和全铅等土壤性质与土传植物病原真菌群落显著相关，说明上述土壤理化因子是影响上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土传植物病原真菌群落组成的关键因子。此外，推测人类活动强度和类型、植被覆盖类型和密度、气温或降水变化等生物及非生物原因，也可能是影响绿地真菌群落组成的重要因素。

本研究结果显示，在上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地35种土传植物病原真菌中，与 *Fusarium solani* 相近类群相对丰度最高，潜在危害性最大。与 *F. oxysporum* 相似，*F. solani* 拥有10种专化型，每种专化型都能侵染多种园林绿化植物，造成植物枯萎病和叶斑病<sup>[34]</sup>。

### 4 结论

本研究选取了上海典型生态廊道绿地120个表层土壤样品 (0 ~ 20 cm)，应用高通量测序方法，分析了上海公园绿地和道路绿地土壤真菌、植物病原真菌和土传植物病原真菌的分布特征，并初步分析了影响土传病原真菌分布的主要因子。主要结论如下：

(1) 上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中共有9大类群真菌，其中 *Ascomycota* (子囊菌门)、*Basidiomycota* (担子菌门) 和 *Zygomycota* (结合菌门) 是上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中优势菌，其丰度分别达到59.5%、14.9%和14.2%。上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土壤中的植物病原真菌共有91个属，144个种水平类群；土传病原真菌有48个属，35个种水平类群，*Fusarium* 和与 *Fusarium solani* 相近类群分别是属、种水平上相对丰度最高的病原真菌。

(2) 上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地真菌群落以及病原真菌群落间存在显著性差异。*Mortierella*、*Talaromyces*、*Guehomyces*、*Trichobotrys*、*Metarhizium*、*Mycorachis*、*Cystofilobasidium*、*Penicillium*、*Gibberella*、*Curvularia* 等菌群在公园绿地和道路绿地中存在显著差异。

(3) pH值、EC值、全钾、有效钾、交换性钠、全铅和全铜是影响上海典型生态廊道公园绿地和道路绿地土传植物病原真菌群落组成的主要因子。

注：文中图表均由作者绘制。

## 参考文献

- [1] 李静, 张浪, 李敬. 城市生态廊道及其分类[J]. 中国城市林业, 2006, 4(5): 46-47.
- [2] 张晨笛, 刘杰, 张浪, 等. 基于城市生态廊道概念应用的三个衍生概念生成与辨析[J]. 中国园林, 2021, 37(11): 109-114.
- [3] LIQUETE C, KLEESCHULTE S, DIGE G, et al. Mapping Green Infrastructure Based on Ecosystem Services and Ecological Networks: A Pan-European Case Study[J]. Environmental Science and Policy, 2015, 54: 268-280.
- [4] 荣月静, 严岩, 王辰星, 等. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7197-7206.
- [5] TIESKENS K F, VAN ZANTEN B T, SCHULP C J E, et al. Aesthetic Appreciation of the Cultural Landscape Through Social Media: An Analysis of Revealed Preference in the Dutch River Landscape[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 177: 128-137.
- [6] BRUGGEN A H C, VAN S A M, DIEPENINGEN A D V, et al. Relation Between Soil Health, Wave-like Fluctuations in Microbial Populations, and Soil-borne Plant Disease Management[J]. European Journal of Plant Pathology, 2006, 115(1): 105-122.
- [7] 朱永官, 彭静静, 书中, 等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(1): 1-11.
- [8] WANG H T, MARSHALL C W, CHENG M Y, et al. Changes in Land Use Driven by Urbanization Impact Nitrogen Cycling and the Microbial Community Composition in Soils[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44-49.
- [9] FIERER N. Embracing the Unknown: Disentangling the Complexities of the Soil Microbiome[J]. Nature Reviews Microbiology, 2017, 15(10): 579-590.
- [10] WALTER G, PAUL D, KADRI P. Biodiversity of Fungi [M]. USA: Academic Press, 2004.
- [11] 国家林业局. 森林土壤pH值的测定: LY/T 1239-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [12] 国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [13] 国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 国家林业局. 森林土壤钾的测定: LY/T 1234-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 农业农业部. 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 农业农村部. 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法: GB/T22105.2-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] SHEN Q L, ZHANG K L, SONG J W, et al. Contrasting Biomass, Dynamics and Diversity of Microbial Community Following the Air-drying and Rewetting of an Upland and a Paddy Soil of the Same Type[J]. Biology and Fertility of Soils, 2018, 54(7): 871-875.
- [18] LU L H, YIN S X, LIU X, et al. Fungal Networks in Yield-In vigorating and Debilitating Soils Induced by Prolonged Potato Monoculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 65: 186-194.
- [19] NGUYEN N H, SONG Z W, BATES S T, et al. FUNGuild: an Open Annotation Tool for Parsing Fungal Community Datasets by Ecological Guild[J]. Fungal Ecology, 2016, 20: 241-248.
- [20] WAKELIN S A, MACDONALD L M, O'CALLAGHAN M, et al. Soil Functional Resistance and Stability are Linked to Different Ecosystem Properties[J]. Austral Ecology, 2014, 39(5): 522-531.
- [21] WANG X, LI Y X, DONG H X, et al. First Report of *Volutella buxi* Causing Volutella Blight on *Buxus bodinieri* in Central Plains China[J]. Plant Disease, 2017, 101(7): 1325.
- [22] COTA L V, MAFFIA L A, MIZUBUTI E S G, et al. Biological Control of Strawberry Gray Mold by *Clonostachys rosea* Under Field Conditions[J]. Biological Control, 2008, 46(3): 515-522.
- [23] TOMIOKA K, HIROOKA Y, AOKI T, et al. Fusarium Rot of Hyacinth Caused by *Gibberella zeae* (Anamorph: *Fusarium graminearum*)[J]. Journal of General Plant Pathology, 2008, 74(3): 264-266.
- [24] GILARDI G, LUONGO I, ORTU G, et al. *Plectosphaerella cucumerina*: A New Pathogen of Rocket in Italy[J]. Protezione Delle Colture, 2013, 2: 73.
- [25] LENC L, KWASNA H, JESKE M, et al. Pathogenic Fungi and Antagonists in Root-Soil Zone in Organic and Integrated Systems of Potato Production[J]. Journal of Plant Protection Research, 2016, 56(2): 167-177.
- [26] SAREMI H, OKHOVAT S M, ASHRAFI S J. Fusarium Diseases as the Main Soil Borne Pathogenic Fungi on Plants and Their Control Management With Soil Solarization in Iran[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(80): 18391-18398.
- [27] ARMENGOL J, VICENT A, MARTINEZ-CULEBRAS P, et al. Identification, Occurrence and Pathogenicity of *Rhizopycnis vagum* on Muskmelon in Spain[J]. Plant Pathology, 2003, 52(1): 68-73.
- [28] ZHANG Y H, JIAN N, TANG F P, et al. The Effects of Different Human Disturbance Regimes on Root Fungal Diversity of *Rhododendron ovatum* in Subtropical Forests of China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2016, 47(5): 659-666.
- [29] PRASETYO J, AENY T N. Diversity and Abundance of Soil-Borne Pathogenic Fungi in Various Land-Use Systems in Sumberjaya, Lampung[J]. Jurnal Hama Dan Penyakit Tumbuhan Tropika, 2012, 6(2): 107-112.
- [30] OEHL F, LACZKO E, BOGENRIEDER A, et al. Soil Type and Land Use Intensity Determine the Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(5): 724-738.
- [31] ZHAO Z X. Effects of Urbanization on the Quantity Changes of Microbes in Urban-to-Rural Gradient Forest Soil[J]. 农业科学与技术(英文版), 2010, 11(3): 118-122.
- [32] NEWBOUND M B, LAUREN T, TIBBITS J, et al. Soil Chemical Properties, Rather than Landscape Context, Influence Woodland Fungal Communities Along an Urban-Rural Gradient[J]. Austral Ecology, 2012, 37(2): 236-247.
- [33] LAUBER C L, STRICKLAND M S, BRADFORD M A, et al. The Influence of Soil Properties on the Structure of Bacterial and Fungal Communities Across Land-Use Types[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(9): 2407-2415.
- [34] CHUNG W C, CHEN L W, HUANG J H, et al. A New 'Forma Specialis' of *Fusarium solani* Causing Leaf Yellowing of Phalaenopsis[J]. Plant Pathology, 2015, 60(2): 244-252.