

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.010

# 城乡梯度下不同林分类型土壤团聚体分布及其稳定性

杨洪炳<sup>1,2</sup>, 肖以华<sup>1\*</sup>, 许涵<sup>1</sup>, 黄子峻<sup>1,3</sup>,  
李明<sup>1</sup>, 郭晓敏<sup>2</sup>, 游慧敏<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2. 江西农业大学林学院, 江西 南昌 330045;  
3. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** [目的] 探究城乡梯度和林分类型对森林土壤团聚体组成及其稳定性机制的影响, 为阐明区域土壤质量评价提供理论依据。[方法] 以珠江三角洲城市群城乡梯度下 3 种典型林分为研究对象, 分析 0~30 cm 土层团聚体稳定性变化特征及其影响因素。[结果] 3 种林分类型土壤团聚体主要由大团聚体 (>0.25 mm) 组成。马尾松林 (PF) 和针阔混交林 (MF) 的水稳性团聚体呈现由大粒径向微团聚体 (<0.25 mm) 转变趋势, 但常绿阔叶林 (BF) 土壤团聚体各粒级比例无明显变化趋势。土壤水稳性团聚体的平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 在城区随 PF-MF-BF 递进呈先升高后降低趋势, 在近郊呈升高趋势, 而在乡村呈先降低后升高趋势。质量分形维数 ( $D_m$ ) 和团聚体结构破坏率 (PAD) 与 MWD、GMD 变化趋势相反。近郊梯度下土壤团聚体稳定性 (机械稳定性和水稳性) 随 PF-MF-BF 递进呈升高趋势。针阔混交林土壤团聚体稳定性在梯度上呈现城区>近郊>乡村趋势。随土层深度增加, 不同梯度的 3 种林分土壤团聚体水稳性降低, 而其机械稳定性升高。土壤团聚体水稳性与土壤密度、含水量和有机碳 (OC)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 含量等呈正相关, 与 pH 及微团聚体含量呈负相关。冗余分析 (RDA) 结果表明, 土壤团聚体在城乡梯度下不同林分类型中分布及其稳定性主要受 OC、TN、TP、pH 等因素影响, TN 为关键影响因子。[结论] 土壤团聚结构稳定性大小与城乡梯度、林分类型及其土层密切相关。将马尾松林改造为针阔混交林, 可有效提高森林土壤质量及抗侵蚀能力。

**关键词:** 珠三角 (PRD); 城乡梯度; 林分类型; 团聚体稳定性; 大团聚体

**中图分类号:** S152.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2022)03-0082-11

随着城市化进程的迅猛发展, 高度城市化的“珠三角”区域面临着城市“热岛效应”、土壤污染、大气污染等环境负荷问题<sup>[1]</sup>。城市化在促进我国经济高速发展的同时, 伴随干旱现象的加剧, 土壤退化、生物多样性减少、水土流失等生态环境问题愈发显露出来, 城市化带来的生态问题受到广泛关注<sup>[2]</sup>。研究表明, 城市化与森林演替对土壤生态系统服务功能产生深远的影响: 城市化降低了城市森

林生态系统土壤质量, 直接改变了其土壤化学元素循环过程<sup>[3]</sup>, 而土壤不同层次间理化性质的差异导致微生物群落变化<sup>[4]</sup>; 城市化导致南亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落生物量降低<sup>[5]</sup>; 森林演替过程中, 土壤微生物群落结构及多样性易受影响, 即植被演替初级阶段到演替顶级阶段, 细菌群落多样性可能会呈先升高后降低趋势<sup>[6]</sup>。前人研究表明, 不同林分类型土壤水稳性大团聚体含量及其平均质量

收稿日期: 2021-10-17 修回日期: 2021-12-12

基金项目: 中国林科院基本科研业务专项 (CAFYBB2018ZB001-7); 广州市林业与园林局“广州市城市森林生态系统效益监测、分析与研究项目 (穗财编 [2019]105 号)”; 广东林业生态定位监测网络平台建设项目 (2020-KYXM-09)

作者简介: 杨洪炳 (1995-), 男, 在读硕士研究生。主要从事植被恢复与生态工程方面研究。E-mail: yhb1314@vip.qq.com

\* 通讯作者: 肖以华 (1976-), 男, 副研究员。主要从事城市化对森林土壤质量与碳中和潜力方面研究。E-mail: jxxiaoyihua@126.com

直径呈现的总体趋势均为: 杉木林>针阔混交林>阔叶混交林<sup>[7]</sup>。总之, 生态环境的变化对土壤结构和性质产生了影响<sup>[3,8]</sup>。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 对土壤系统功能(如结构稳定和肥力保持等)至关重要<sup>[9]</sup>, 稳定的土壤团聚结构可促进土壤肥力的保持及提升, 能够明显改善土壤质量<sup>[10]</sup>。土壤团聚体稳定性与土壤成土母质、植被类型、微生物及有机质含量等紧密相关<sup>[9]</sup>。国外学者注重土壤有机碳与团聚体相互作用机制和量化团聚体稳定性理论研究<sup>[11-12]</sup>, 而国内不少学者研究山地<sup>[13]</sup>、农田<sup>[14]</sup>、森林<sup>[15]</sup>等生态系统土壤团聚体稳定性特征及其对外界环境变化的响应, 其中, 对森林生态系统的土壤团聚体分布特征与稳定性研究存在不足。探究森林土壤团聚体结构稳定性, 对掌握森林土壤有机碳稳定性机制及其固碳潜力有重要意义。

马尾松(*Pine massoniana* Lamb.)林、针阔混交林与常绿阔叶林是珠三角地区典型植被类型, 在城市生态气候调节和参与地球生物化学循环中有着重要的地位<sup>[16]</sup>。珠三角地区森林生态系统中土壤团聚体分布、稳定性特征及其变化的驱动因素研究甚少, 且不同筛分方式下土壤团聚体的稳定特性存在差异。因此, 本文以珠三角地区城乡梯度下不同林分类型土壤为研究对象, 探究干筛和湿筛方式下不同林分类型土壤团聚体粒径分布及稳定性特征, 分析其团聚体分布及稳定性的影响因素, 旨在补充城乡梯度下不同林分类型土壤结构的相关研究, 丰富珠三角地区关于森林土壤团聚体稳定性方面的理论。研究结果为城市森林生态环境保护及科学评价该区域不同林分类型所发挥的生态系统功能提供理论依据。

## 1 研究区概况

本研究试验区域位于高度城市化、工业化的珠江三角洲地区(112°45'~113°50' E, 21°31'~23°10' N), 该区域属于亚热带温暖湿润气候, 旱、雨季分明, 一般10月至次年3月为旱季, 4—9月为雨季, 年均降水量1380~1927 mm, 年均气温为19.5~21.9℃。研究区域土壤发育母质为花岗岩, 土壤类型为黄红壤<sup>[17]</sup>。除了城区的帽峰山(常绿阔叶林)属于天然次生林外, 其余均为人工林。其他样地基本信息详见表1, 其他性质特征详见表2。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计与样品采集

参考Fang等<sup>[17]</sup>对城乡梯度的划分方式, 以广州市中心(天河区)为中心, 将研究区域划分为“城区—近郊—乡村”3个梯度。在每个梯度中选取3种林分类型(马尾松林、针阔混交林和常绿阔叶林), 在每种林分类型区域中设置3个40 m×40 m样地, 每个样地中随机选择3个10 m×10 m样方进行采样, 样方间距大于10 m。

2020年12月15日至30日, 在各个研究区域采集土壤样品。在每个样地的样方中, 采样尽可能避开粗根和石块。在各样方内按“S”型布置5个样点, 清除土壤表面枯落物、植物残体、石块等杂质, 在每个样点用铁铲采集0~10、10~30 cm土层原状土, 再将每个样方内同土层土样混为一个原状土样。同时用环刀在每个样方内各土层取1个土样, 用于土壤密度和质量含水量的测定。

### 2.2 样品处理与测定方法

土样采集完毕后及时带回实验室, 将土样铺开, 挑出粗根、枯落物及石块等杂质, 待自然风干。土壤密度、质量含水量分别采取环刀法和烘干法测定。土壤碳和养分、酸碱度采用常规方法<sup>[18]</sup>测定: 重铬酸钾氧化—外加热法测定土壤有机碳(SOC)含量。采用扩散法测定土壤全氮(TN)含量, 采用钼锑抗比色法测定土壤全磷(TP)含量。采用电位计法(PHS-3C型)测定土壤pH值, 重复3次。土壤团聚体粒径组成测定参考黎宏祥<sup>[19]</sup>、于法展等<sup>[20]</sup>和Six等<sup>[21]</sup>方法, 略有改进, 即取200 g风干土样, 测定前挑除石块、细根, 将所有土样过8 mm筛, 再振荡5 min。采取人工干筛法, 即筛取6个粒级(>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5、<0.25 mm)团聚体, 用0.01 g精度电子秤称量各个粒级团聚体质量, 计算不同粒级土壤团聚体质量分数, 依其相应将各样品配成50.00 g土样, 用于水稳性团聚体含量的测定。水稳性团聚体测定采用人工湿筛法, 即在原套筛中进行土样快速湿润, 静置5 min, 然后上下振荡5 min, 振荡频率为30次·min<sup>-1</sup>, 振幅5 cm。将湿筛后土样转入铝盒, 105℃烘干至恒质量。

### 2.3 数据处理

在Excel 2010软件上完成数据的计算与整理, 进一步利用SPSS 26.0和Origin 2019b软件

表 1 样地基本信息  
Table 1 Basic information about the sample site

城乡梯度 Urban-rural gradient	林分类型 Forest types	地点 Location	平均海拔 Mean elevation/m	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	坡度 Slope/ (°)	主要优势乔木 Major dominant trees	平均林龄 Mean forest age/a	平均胸径 Mean breast diameter/cm	密度 Density/ (株·hm <sup>-2</sup> )
	PF	FRZ	54.0	113°13'39"	23°30'22"	3.0	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> Lamb.)	25	20.6	8 500
城区 Urban	MF	HLS	36.3	113°22'32"	23°11'18"	8.5	木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)	40	30.2	3 500
							马占相思 ( <i>Acacia mangium</i> Willd.)			
							降香 ( <i>Dalbergia odorifera</i> T. Chen)			
							马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> Lamb.)			
近郊 Suburban	BF	MFS	152.3	113°26'39"	23°17'44"	24.8	润楠 ( <i>Machilus pingii</i> Cheng ex Yang)	80	31.3	1 500
							中华锥 ( <i>Castanopsis chinensis</i> (Sprengel) Hance)			
							罗浮栎 ( <i>Diospyros morrisiana</i> Hance)			
							鸭脚木 ( <i>Schefflera octophylla</i> (Lour.) Harms)			
乡村 Rural	PF	LXHF	175.3	113°46'47"	23°45'47"	6.0	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> Lamb.)	30	24.2	2 000
							木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)			
							中华锥 ( <i>Castanopsis chinensis</i> (Sprengel) Hance)			
							华润楠 ( <i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hems.)、 马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> Lamb.)			
乡村 Rural	MF	LS*	435.7	113°50'23"	23°43'57"	26.5	木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)	40	15.8	3 000
							中华锥 ( <i>Castanopsis chinensis</i> (Sprengel) Hance)			
							华润楠 ( <i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hems.)、 罗浮栎 ( <i>Castanopsis faberi</i> Hance)			
							木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)			
乡村 Rural	BF	WS*	519.0	113°48'37"	23°43'29"	15.0	中华锥 ( <i>Castanopsis chinensis</i> (Sprengel) Hance)	45	23.5	8 425
							华润楠 ( <i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hems.)、 罗浮栎 ( <i>Castanopsis faberi</i> Hance)			
							马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> Lamb.)			
							木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)			
乡村 Rural	PF	LCF	627.3	113°19'35"	25°13'17"	21.0	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> Lamb.)	26	21.6	2 500
							马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> Lamb.)、 木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)、 华润楠 ( <i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hems.)			
							木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)			
							罗浮栎 ( <i>Castanopsis faberi</i> Hance)			
乡村 Rural	BF	WS*	519.0	113°30'55"	25°18'19"	20.0	蕪蒴锥 ( <i>Castanopsis fissa</i> (Champion ex Bentham) Rehder et E. H. Wilson)	35	13.3	2 000

注: PF, 马尾松林; MF, 针阔混交林; BF, 常绿阔叶林; FRZ, 芙蓉嶂; HLS, 火炉山; MFS, 帽峰山; MFL, 流溪河林场; XKF, 小坑林场; LNFP, 流溪河国家森林公园; LCF, 乐昌林场; LS, 龙山; WS, 五山。""表示有较强人为干扰。下同。  
Notes: PF, *Pinus massoniana* forest; MF, Mixed coniferous and broad-leaved forest; BF, Broadleaved forest; FRZ, Furongzhang; HLS, Huolushan; MFS, Maofengshan; LXHF, Liuxihe forest farm; XKF, Xiaokeng forest farm; LNFP, Liuxihe national forest park; LCF, Lechang forest farm; LS, Longshan; WS, Wushan. "" indicates strong human interference. Same as below.

表2 城乡梯度下不同林分类型土壤基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of soils of different stand types under the urban-suburban-rural gradient

指标 Indexes	土层 Soil layers/cm	城区 Urban			近郊 Suburban			乡村 Rural		
		PF	MF	BF	PF	MF	BF	PF	MF	BF
含水量 Water content/%	0~10	11.93±2.02	10.11±1.67	17.60±3.12	11.93±3.34	13.97±2.97	19.74±2.60	17.25±5.32	17.74±4.93	22.35±4.16
	10~30	12.32±2.07	10.12±1.16	16.96±2.47	11.95±1.44	13.55±3.31	17.44±2.79	15.51±4.20	15.36±4.44	21.07±2.71
土壤密度 Soil density/(g·cm <sup>-3</sup> )	0~10	1.57±0.03	1.44±0.04	1.31±0.06	1.39±0.06	1.28±0.12	1.13±0.08	1.26±0.15	1.03±0.17	0.98±0.03
	10~30	1.62±0.00	1.55±0.03	1.47±0.03	1.43±0.04	1.46±0.08	1.36±0.10	1.34±0.09	1.17±0.07	1.19±0.05
pH	0~10	4.01±0.04	4.23±0.04	4.31±0.10	4.02±0.10	4.37±0.03	4.40±0.07	4.15±0.08	4.07±0.13	4.33±0.20
	10~30	4.25±0.01	4.44±0.01	4.45±0.12	4.38±0.04	4.43±0.09	4.43±0.12	4.46±0.07	4.43±0.01	4.46±0.09

对处理后数据进行统计分析和图表绘制。采取单因素方差检验 (LSD 法) 和 Wilcoxon 符号秩和检验方法, 对所有样品土壤团聚体粒径组成比例及其稳定性特征间进行显著差异性检验。通过一般线性模型单变量分析环境因子及其交互作用对团聚体稳定性特征的影响。利用 Canoco 5 软件对土壤团聚体稳定性特征与土壤因子的关系进行冗余分析, 并进行土壤因素解释量分析与显著性检验。图表数据均为平均值±标准差 ( $n=9$ )。

用平均质量直径 ( $MWD$ )、几何平均直径 ( $GMD$ )、质量分形维数 ( $D_m$ ) 及一定粒级团聚体破坏率 ( $PAD$ ) 指标和  $R_{0.25}$  ( $>0.25$  mm 的大团聚体百分含量) 来评价土壤团聚体稳定性。以上指标计算参考 Qiao<sup>[22]</sup> 等和杨金玲<sup>[23]</sup> 等, 公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \times w_i$$

$$GMD = E \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \lg \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]$$

$$PAD = \frac{W_a - W_b}{W_a} \times 100\%$$

$$D_m = 3 - S[(\ln(m_{a1}), \ln(m_{a2}), \dots, \ln(m_{an}), (\ln(d_1), \ln(d_2), \dots, \ln(d_n))]$$

式中:  $\bar{X}_i$  为筛分出的任一粒径团聚体的平均直径,  $w_i$  为任一粒径团聚体质量占样品干质量的比例,  $n$  为土壤样品数量,  $W_i$  为各粒级团聚体质量,  $E$  为以自然常数  $e$  为底的指数函数计算。  $m_{an}$  为各粒级按从小到大排序的团聚体质量进行累加的累计质量,  $d_n$  为各粒级的平均粒径,  $S$  表示进行斜率计

算,  $W_a$  和  $W_b$  分别为干筛法和湿筛法测定的  $R_{0.25}$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城乡梯度下不同演替阶段森林土壤团聚体粒径分布特征

不同筛分方式下, 城乡梯度下不同林分类型 0~30 cm 土层团聚体粒径分布均以大团聚体 ( $>0.25$  mm) 为主 (表 3)。城乡梯度和林分类型对 0~10 cm 土层中干筛方式下 1~2 mm 粒径的团聚体组成和湿筛方式下 0.25~0.5 mm 粒径的团聚体组成无显著影响 (NS), 且对 10~30 cm 土层中干筛方式下 2~5 mm 和 0.5~1 mm 粒径团聚体组成无显著影响 (NS), 对其他均有显著影响 ( $p < 0.05$ )。

#### 3.2 城乡梯度下不同林分森林土壤团聚体稳定性特征

表 4 表明: 城乡梯度下不同林分类型在不同土层的土壤大团聚体 ( $>0.25$  mm) 含量各有差异, 除乡村梯度下马尾松林和常绿阔叶林在 0~10 cm 土层干筛和湿筛的  $R_{0.25}$  差异不显著外, 其他情况下在各自土层中 2 种筛分方式的  $R_{0.25}$  之间均差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 1 表明: 不同筛分方式下表征其土壤团聚体稳定性特征指标间各有差异。干筛方式下, 从  $MWD$  指标看 (图 1A), 不同梯度在相同林分类型的 2 个土层中表现各异; 随城区向近郊梯度递进, 3 种林分 0~30 cm 土层团聚体稳定性均呈降低趋势 (图 1A)。湿筛方式下, 从  $MWD$  指标看, 城乡梯度下相同林分类型间团聚体稳定性差异不尽相同 (图 1D)。在 2 种筛分方式下,  $D_m$  在不同梯度或不同林分类型间呈现规律不明显, 在土层间均



表 3 城乡梯度下不同林分类型土壤团聚体分布特征  
Table 3 Distribution characteristics of soil agglomerates in different forest types under the urban-rural gradient

粒级 Particle size/mm	P	团聚体不同粒径占总质量百分比 Agglomerates of different particle sizes as a percentage of total weight/%											
		城区 Urban				近郊 Suburban				乡村 Rural			
		PF	MF	BF	PF	MF	BF	PF	MF	BF	PF	MF	BF
		0~10 cm											
>5	<0.001	26.25±7.98 aA	22.89±8.79 aA	22.39±7.60 aA	5.28±3.35 bA	9.86±7.04 abAB	15.98±5.13 aB	26.39±11.29 aA	7.50±4.61 bB	11.93±5.93 aC			
	<0.001	<b>13.14±5.17 aA</b>	<b>16.59±7.99 aA</b>	<b>11.76±5.63 aA</b>	<b>3.04±2.41 bA</b>	<b>6.60±3.51 abB</b>	<b>11.48±4.21 aC</b>	<b>13.25±8.57 aA</b>	<b>5.37±3.43 bB</b>	<b>10.15±5.40 aA</b>			
2~5	0.004	21.67±3.95 aAB	18.71±7.02 aA	17.32±4.80 aB	20.71±9.19 aA	16.74±3.61 aB	16.89±3.82 aB	19.85±5.69 aA	10.50±4.93 aB	20.21±4.88 aB			
	0.003	<b>13.81±2.84 aA</b>	<b>16.62±5.22 aA</b>	<b>11.78±4.39 aA</b>	<b>13.16±7.03 aA</b>	<b>12.66±3.58 abA</b>	<b>14.95±3.54 aA</b>	<b>11.46±3.67 aA</b>	<b>7.81±3.25 bB</b>	<b>15.35±3.73 aC</b>			
1~2	NS	12.44±1.79 aA	12.63±9.49 aA	14.18±3.08 aA	18.20±5.63 aA	16.42±4.94 aA	15.03±4.66 aA	11.92±2.08 aA	11.11±2.51 aB	13.52±6.22 aC			
	0.002	<b>12.11±2.59 aA</b>	<b>14.34±10.25 abAB</b>	<b>15.15±2.31 aB</b>	<b>16.69±5.17 aA</b>	<b>17.57±4.36 aA</b>	<b>16.40±4.19 aA</b>	<b>12.10±1.56 aA</b>	<b>8.82±1.81 bB</b>	<b>18.52±6.94 aC</b>			
0.5~1	0.011	16.94±7.06 aB	16.73±9.80 aA	20.96±3.50 aA	29.13±12.57 aA	23.11±6.84 aAB	22.15±5.42 aB	15.57±5.55 bA	17.84±5.15 aB	20.36±7.86 aA			
	<0.001	<b>17.94±4.35 abA</b>	<b>17.74±7.89 aA</b>	<b>24.86±3.63 aB</b>	<b>22.63±8.35 aA</b>	<b>24.68±5.54 bA</b>	<b>23.84±5.17 aA</b>	<b>16.08±3.67 bA</b>	<b>14.45±3.49 aA</b>	<b>22.53±5.08 aB</b>			
0.25~0.5	0.029	15.03±5.42 aA	19.02±11.63 aA	14.78±4.34 aA	15.29±4.65 aA	18.57±3.14 aB	18.00±4.64 aAB	12.16±5.42 aA	22.59±6.02 aB	20.28±8.41 aA			
	NS	<b>19.13±4.71 aA</b>	<b>15.94±10.24 aAB</b>	<b>13.99±2.85 aB</b>	<b>14.44±5.44 aA</b>	<b>16.49±3.16 aA</b>	<b>15.03±5.50 aA</b>	<b>15.92±5.40 aA</b>	<b>17.27±2.85 aA</b>	<b>13.67±6.69 aA</b>			
<0.25	<0.001	7.68±3.05 aA	10.02±5.70 aA	10.38±4.38 aA	11.39±4.41 aAB	15.30±3.48 abA	11.95±3.42 aB	14.12±5.67 aA	30.46±10.27 bB	13.71±6.33 aA			
	<0.001	<b>22.89±4.74 aA</b>	<b>18.20±6.80 aA</b>	<b>21.84±6.20 aA</b>	<b>28.98±7.80 bA</b>	<b>21.22±3.54 aB</b>	<b>17.57±3.99 aB</b>	<b>30.14±3.97 bA</b>	<b>45.33±8.94 bB</b>	<b>19.49±5.78 aC</b>			
		10~30 cm											
>5	<0.001	27.04±11.92 aAB	22.70±8.03 aA	34.88±7.85 aB	3.54±3.71 bA	18.54±11.14 aB	24.71±4.00 aB	32.44±16.65 aA	11.13±5.24 aB	15.46±12.26 aB			
	0.005	<b>4.52±3.45 aAB</b>	<b>7.60±3.80 aA</b>	<b>3.06±2.31 aB</b>	<b>1.74±2.00 aA</b>	<b>8.51±7.22 aB</b>	<b>9.68±2.88 bB</b>	<b>5.38±4.68 aA</b>	<b>4.60±2.02 aA</b>	<b>6.10±7.21 abA</b>			
2~5	NS	18.16±2.54 aA	21.72±6.14 aA	18.30±2.53 aA	14.44±8.64 aA	17.95±5.91 abA	19.66±3.13 aA	18.25±5.97 aA	12.65±3.00 bB	19.14±8.74 aAB			
	<0.001	<b>4.65±1.66 aA</b>	<b>13.04±4.09 aB</b>	<b>6.44±4.05 aA</b>	<b>5.43±3.95 aA</b>	<b>10.61±4.16 aB</b>	<b>14.55±2.28 bB</b>	<b>6.31±3.66 aA</b>	<b>6.57±2.11 aA</b>	<b>12.25±6.19 abB</b>			
1~2	<0.001	13.88±4.95 aA	17.22±6.49 abA	13.63±2.67 aA	28.53±7.89 bA	18.04±3.74 aB	15.88±3.08 aB	11.58±3.04 aA	9.56±2.23 bA	13.85±6.16 aA			
	<0.001	<b>8.95±1.47 aA</b>	<b>17.09±4.92 aB</b>	<b>14.92±5.29 aB</b>	<b>15.47±5.85 bA</b>	<b>17.66±3.06 aA</b>	<b>19.88±6.98 bA</b>	<b>7.60±2.91 aA</b>	<b>6.24±1.83 bA</b>	<b>16.60±6.81 abB</b>			
0.5~1	NS	17.37±5.95 aA	18.78±4.39 aA	13.55±5.05 aA	22.19±7.55 aA	14.68±4.24 aB	18.12±2.39 aA	14.03±9.03 aA	14.02±4.36 aA	15.29±10.10 aA			
	<0.001	<b>20.60±3.76 aA</b>	<b>19.81±2.68 aA</b>	<b>25.41±3.17 aB</b>	<b>15.00±4.19 aA</b>	<b>19.12±3.21 abB</b>	<b>21.27±1.87 abB</b>	<b>16.20±5.32 aA</b>	<b>9.89±3.18 bB</b>	<b>16.24±6.82 bA</b>			
0.25~0.5	0.003	15.20±7.54 aA	11.54±4.58 aA	11.41±2.71 aA	18.95±6.47 aA	16.59±5.74 aAB	13.46±2.41 aB	10.86±5.15 aA	18.35±4.99 aB	21.13±11.09 aA			
	0.001	<b>22.25±4.93 aA</b>	<b>14.15±2.22 aB</b>	<b>18.55±5.16 aAB</b>	<b>12.83±3.94 bA</b>	<b>17.88±4.35 aB</b>	<b>13.81±2.96 aA</b>	<b>15.12±4.12 abA</b>	<b>14.07±3.28 aA</b>	<b>16.91±8.71 aA</b>			
<0.25	<0.001	8.35±4.49 aA	8.03±3.42 aA	8.24±3.09 aA	12.36±4.68 aA	14.19±6.00 abA	8.17±2.16 aB	12.83±5.84 aA	34.28±11.92 bB	15.12±9.71 aA			
	<0.001	<b>38.28±3.43 aA</b>	<b>27.25±8.09 aB</b>	<b>30.87±8.87 aB</b>	<b>48.49±10.03 aA</b>	<b>25.46±6.22 aB</b>	<b>19.96±4.68 bC</b>	<b>48.57±12.70 aA</b>	<b>58.06±9.35 bA</b>	<b>31.30±8.49 aB</b>			

注：表中加粗部分为湿筛数据，正常部分为干筛数据。不同小写字母表示相同筛分方式下相同林分类型的相同粒级团聚体组成在不同梯度间差异显著 ( $p < 0.05$ )；不同大写字母表示相同筛分方式和相同梯度下相同粒级团聚体在不同林分类型之间呈显著性差异 ( $p < 0.05$ )。P值表示城乡梯度和森林类型对同一行数据中对应粒级比例显著性影响水平，NS表示无显著影响。  
Notes: The bold part in the table is the wet sieving data, and the normal part is the dry sieving data. Different lowercase letters indicate that the composition of aggregates of the same grain size in the same stand type under the same sieving method is significantly different between different gradients at 0.05 level; There were significant differences among different stand types at 0.05 level. The p-value indicates the level of significance of the urban-rural gradient and forest stand type on the proportion of the corresponding grain size in the same row of data, and NS indicates no significant effect.

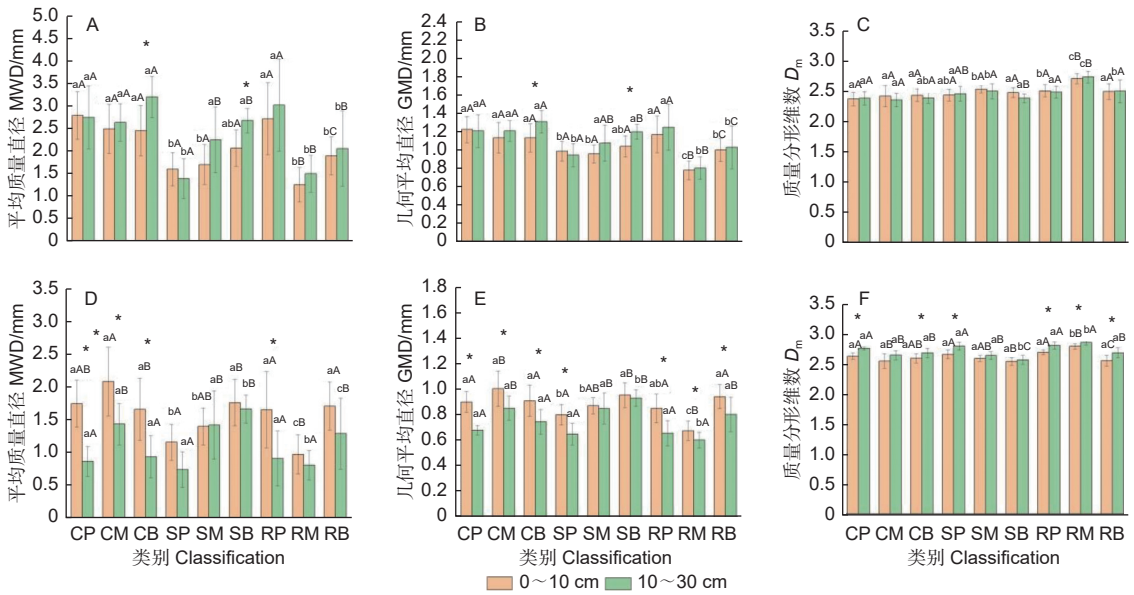
表 4 城乡梯度下不同林分类型土壤大团聚体 (>0.25 mm) 含量

Table 4 Content of large aggregates (>0.25 mm) at different forest types under the urban-rural gradient

城乡梯度 Urban-rural gradient	林分类型 Forest types	大团聚体占总质量百分含量 Large agglomerates as a percentage of total mass/%			
		0~10 cm		10~30 cm	
		干筛 Dry sieve	湿筛 Wet sieve	干筛 Dry sieve	湿筛 Wet sieve
城区 Urban	PF	69.54±3.05 cA	77.11±4.74 aB	65.72±4.49 bA	61.72±3.43 abcdC
	MF	85.88±5.07 bcA	81.80±6.80 aB	87.17±3.42 bA	72.95±8.09 cdeC
	BF	92.32±4.38 bcA	78.16±6.20 aB	91.65±3.09 bA	69.13±8.87 bcdeC
近郊 Suburban	PF	88.61±4.41 bcA	71.02±7.80 bB	87.64±4.68 abA	51.51±10.03 abC
	MF	84.70±3.48 abA	78.78±3.54 aB	85.81±6.00 abA	74.54±6.22 deB
	BF	88.05±3.42 abcA	82.43±3.99 aB	91.83±2.16 bC	80.04±4.68 eB
乡村 Rural	PF	89.62±5.67 abcAB	69.86±3.97 bBC	91.76±5.84 abA	51.43±12.70 abcC
	MF	86.29±10.27 aA	54.67±8.94 cB	84.88±11.92 aA	41.94±9.35 aC
	BF	89.98±6.33 abcA	80.51±5.78 aA	91.97±9.71 abA	68.70±8.49 bcdeB

注: 不同小写字母表示在相同土层的相同筛分方式下所有数据间呈显著性差异 ( $p < 0.05$ ); 不同大写字母表示在相同梯度和相同林分类型下所有数据间呈显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

Notes: Different lowercase letters indicate significant differences between all data for the same sieving method in the same soil layer at 0.05 level; different capital letters indicate significant differences between all data for the same gradient and the same stand type at 0.05 level.



注: 土壤团聚体机械稳定性 (A, B, C), 土壤团聚体水稳定性 (D, E, F)。不同小写字母表示不同梯度下相同林分类型在相同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ ); 不同大写字母表示相同梯度下不同林分类型在相同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )。\*\*\*表示相同梯度和相同林分类型下不同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )。CP, 城区马尾松林; CM, 城区针阔混交林; CB, 城区常绿阔叶林; SP, 近郊马尾松林; SM, 近郊针阔混交林; SB, 近郊常绿阔叶林; RP, 乡村马尾松林; RM, 乡村针阔混交林; RB, 乡村常绿阔叶林。下同。

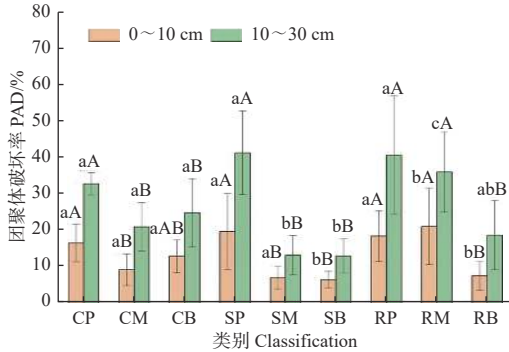
Notes: Mechanical stability of soil aggregates (A, B, C), water stability of soil aggregates (D, E, F). Different lowercase letters indicate significant differences between the same forest types at different gradients and between the same soil layers at 0.05 level; different capital letters indicate significant differences between different forest types at the same gradient and between the same soil layers at 0.05 level. \*\*\* indicates significant differences between different soil layers at the same gradient and the same forest type at 0.05 level. CP, urban pine forest; CM, urban coniferous and broad-leaved mixed forest; CB, urban evergreen broadleaf forest; SP, suburban pine forest; SM, suburban coniferous and broad-leaved mixed forest; SB, suburban evergreen broadleaf forest; RP, rural pine forest; RM, rural coniferous and broad-leaved mixed forest; RB, rural broadleaved evergreen forest. Same below.

图 1 城乡梯度下不同林分类型土壤团聚体稳定性特征

Fig. 1 Stability characteristics of forest soil aggregates at different forest types under the urban-rural gradient

值差异呈现结果相反。除了近郊梯度下的马尾松林,其他林分土壤团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 均值在干筛和湿筛下呈现结果在土层间相反,可知3种林分土壤机械稳定性呈现下层(10~30 cm)大于表层(0~10 cm),其水稳定性则表现相反。

城乡梯度下各林分类型的团聚体破坏率(*PAD*)介于6.4%~41.1%,在城乡梯度、林分类型及其土层间差异较大(图2)。各梯度下3种林分不同土层间的 *PAD* 表现规律一致,即随土层



注:不同小写字母表示不同梯度下相同林分类型相同土层间差异显著( $p < 0.05$ );不同大写字母表示相同梯度下不同林分类型相同土层间呈显著性差异( $p < 0.05$ )。

Notes: Different lowercase letters indicate significant differences between the same soil layer of the same stand type under different gradients at 0.05 level; different capital letters indicate significant differences between the same soil layers of different stand types under the same gradient at 0.05 level.

图2 城乡梯度下不同林分类型土壤团聚体破坏率特征

Fig. 2 Characteristics of the destruction rate of forest soil aggregates at different forest stand types under the urban-rural gradient

表5 城乡梯度、林分类型、土层及其交互作用与土壤团聚体稳定性特征的关系

Table 5 Relationships between the urban-rural gradient, forest types, soil layers and their interactions with the stability characteristics of soil aggregates

稳定性特征 Stability characteristics	城乡梯度 Urban-rural gradient(URG)		林分类型 Forest types(FT)		土层 Soil layers(SL)		城乡梯度×林分类型 URG×FT		城乡梯度×土层 URG×SL		林分类型×土层 FT×SL		城乡梯度×林分类型×土层 URG×FT×SL	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
<i>M_MWD</i>	28.115	<0.001	9.267	<0.001	9.597	0.002	16.565	<0.001	0.064	0.938	2.499	0.086	1.401	0.237
<i>M_GMD</i>	25.97	<0.001	13.251	<0.001	7.700	0.006	12.771	<0.001	0.233	0.792	1.907	0.152	1.103	0.357
<i>M_D<sub>m</sub></i>	34.554	<0.001	13.960	<0.001	1.487	0.225	6.658	<0.001	0.461	0.632	0.642	0.528	0.632	0.640
<i>W_MWD</i>	4.907	0.009	9.782	<0.001	56.939	<0.001	14.373	<0.001	8.038	<0.001	4.076	0.019	0.250	0.909
<i>W_GMD</i>	16.14	<0.001	23.219	<0.001	71.671	<0.001	18.892	<0.001	4.832	0.009	4.567	0.012	0.326	0.860
<i>W_D<sub>m</sub></i>	33.811	<0.001	41.275	<0.001	73.289	<0.001	18.848	<0.001	1.104	0.334	2.602	0.078	1.154	0.334
<i>PAD</i>	9.818	<0.001	44.937	<0.001	112.725	<0.001	11.711	<0.001	1.084	0.341	6.434	0.002	0.779	0.540

注:前缀*M\_*表示机械稳定性特征;前缀*W\_*表示水稳定性特征。

Notes: The prefix *M\_* indicates mechanical stability characteristics; The prefix *W\_* indicates the water stability characteristic.

深度增加而升高。在0~30 cm土层中,城市(城区与近郊)梯度下马尾松林土壤的 *PAD* 显著高于其他林分( $p < 0.05$ ),乡村梯度下常绿阔叶林土壤的 *PAD* 显著低于其他林分( $p < 0.05$ )。

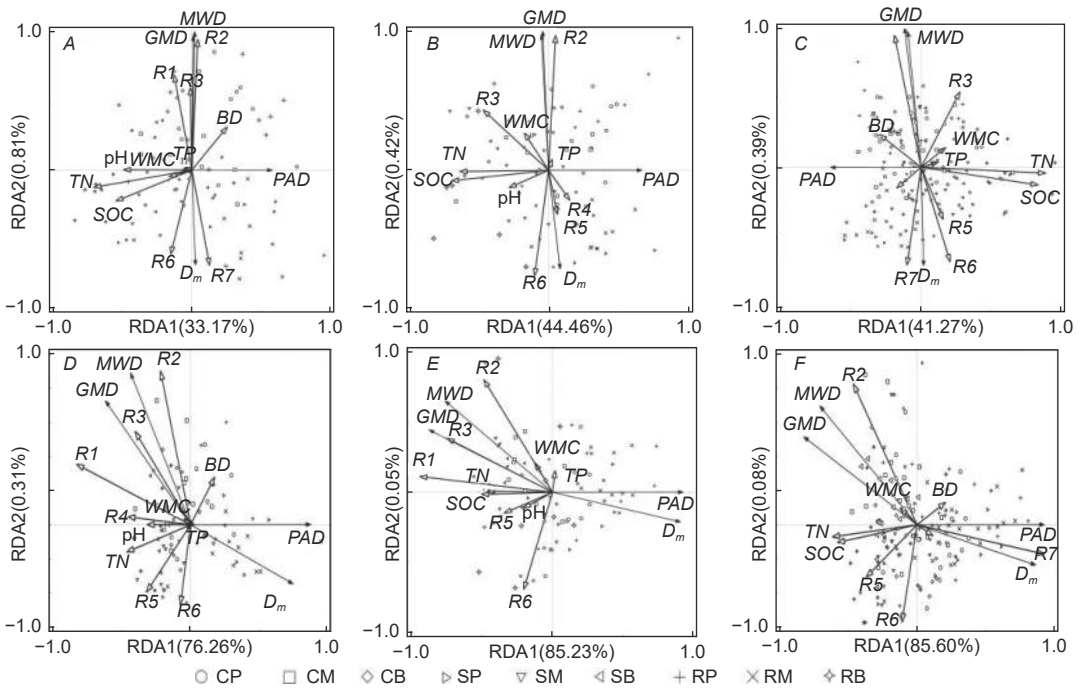
### 3.3 城乡梯度、林分类型、土层及其交互作用与土壤团聚体稳定性特征的关系

由表5可知:城乡梯度和林分类型及二者的交互作用对机械稳定性团聚体的 *MWD*、*GMD* 与 *D<sub>m</sub>* 影响极显著( $P < 0.001$ ),而土层对其 *MWD* 和 *GMD* 也影响极显著( $P < 0.01$ );城乡梯度、林分类型及土层对水稳性团聚体的 *MWD*、*GMD* 和 *D<sub>m</sub>* 影响极显著( $P < 0.01$ ),且其两两交互作用均对 *MWD* 和 *GMD* 影响显著( $P < 0.05$ )。城乡梯度、林分类型及土层对 *PAD* 的影响极显著( $P < 0.01$ ),同时林分类型与城乡梯度、土层的交互作用对 *PAD* 的影响极显著( $P < 0.01$ )。

### 3.4 土壤团聚体稳定性特征与土壤因子的关系

不同土层在不同筛分方式下的团聚体稳定性特征与土壤因子相关关系有所差异(图3)。干筛的综合分析(图3C)表明:土壤有机碳(SOC)、TN与 *PAD*、*MWD*、*GMD* 呈负相关关系,与 *D<sub>m</sub>* 呈正相关关系。湿筛的综合分析(图3F)表明:土壤含水量、SOC、TN、粒径(>5 mm)团聚体含量与 *MWD* 和 *GMD* 呈正相关关系,而与 *PAD* 和 *D<sub>m</sub>* 呈负相关关系。

经置换检验,得到土壤因子解释量与显著性检验结果(表6)表明:干筛下,TN对0~10 cm土层解释度较高,而SOC对10~30 cm土层解释



注: 图 A 为干筛方式下 0~10 cm 土层; 图 B 为干筛方式下 10~30 cm 土层; 图 C 为干筛方式下的综合分析; 图 D 为湿筛方式下 0~10 cm 土层; 图 E 为湿筛方式下 10~30 cm 土层; 图 F 为湿筛方式下的综合分析。R1, >0.25 mm 粒径团聚体比例; R2, >5 mm 粒径团聚体比例; R3, 2~5 mm 粒径团聚体比例; R4, 1~2 mm 粒径团聚体比例; R5, 0.5~1 mm 粒径团聚体比例; R6, 0.25~0.5 mm 粒径团聚体比例; R7, <0.25 mm 粒径团聚体比例; BD, 密度; WMC, 质量含水量。下同。

Notes: Figure A shows the 0-10 cm soil layer under the dry sieving method; figure B shows the 10-30 cm soil layer under the dry sieving method; figure C shows the combined analysis under the dry sieving method; figure D shows the 0-10 cm soil layer under the wet sieving method; figure E shows the 10-30 cm soil layer under the wet sieving method; figure F shows the combined analysis under the wet sieving method. R1, proportion of >0.25 mm particle size agglomerates; R2, proportion of >5 mm agglomerates; R3, proportion of 2-5 mm agglomerates; R4, proportion of 1-2 mm agglomerates; R5, proportion of 0.5-1 mm agglomerates; R6, proportion of 0.25-0.5 mm agglomerates; R7, proportion of <0.25 mm agglomerates; BD, bulk density; WMC, mass water content. Same as below.

图 3 土壤团聚体分布和稳定性特征与土壤因子的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of the distribution and stability characteristics of soil aggregates and soil factors

表 6 不同筛分方式下土壤因子解释量与显著性检验结果

Table 6 Soil factors explained amount and significance test results under different screening methods

土壤因子 Soil factors	干筛 Dry sieves									湿筛 Wet sieves								
	0~10 cm			10~30 cm			综合分析 Comprehensive analysis			0~10 cm			10~30 cm			综合分析 Comprehensive analysis		
	解释量 Volume of explanation/ %	F	P	解释量 Volume of explanation/ %	F	P	解释量 Volume of explanation/ %	F	P	解释量 Volume of explanation/ %	F	P	解释量 Volume of explanation/ %	F	P	解释量 Volume of explanation/ %	F	P
有机碳 OC	<0.1	<0.1	0.846	21.6	21.8	0.002	1.0	2.5	0.120	0.2	0.4	0.542	1.8	7.6	0.014	0.3	3.2	0.062
全氮 TN	16.5	15.4	0.002	0.5	0.6	0.438	32.2	75.6	0.002	6.8	12.8	0.004	<0.1	0.2	0.594	4.3	30.3	0.002
全磷 TP	1.9	1.9	0.168	2.9	3.6	0.078	3.2	7.8	0.004	0.2	0.5	0.490	<0.1	<0.1	0.834	0.6	0.9	0.330
质量 含水量 WMC	3.9	3.9	0.050	3.9	4.7	0.046	1.0	2.6	0.114	6.5	19.8	0.002	1.2	5.5	0.008	2.8	28.1	0.002
pH	3.8	3.7	0.056	1.6	2.1	0.144	1.1	1.8	0.184	0.2	0.6	0.422	0.6	3.0	0.118	0.2	2.3	0.140
密度 BD	1.9	1.9	0.154	<0.1	<0.1	0.876	0.4	1.0	0.308	2.8	6.8	0.012	-	-	-	1.4	11.8	0.002



度较高；干筛综合分析得出，TN 可以解释团聚体组成与稳定性特征差异的 32.2% ( $P = 0.002$ )。湿筛下，TN 对 0~10 cm 土层的解释较显著，解释量为 6.8% ( $P = 0.004$ )，而 SOC 对 10~30 cm 土层的解释较显著，解释量为 1.8% ( $P = 0.014$ )。湿筛综合分析得出，TN 和土壤含水量的解释度较高，分别为 4.3% 和 2.8%。

## 4 讨论

### 4.1 城乡梯度下不同林分类型森林土壤团聚体分布及稳定性特征

目前，研究森林土壤团聚体往往侧重于其水稳定性特征，常按照 0.25 mm 作为水稳性团聚体粒径大小的分界点，超过该界点则称为大团聚体，否则称为微团聚体<sup>[15]</sup>。本研究结果表明：土壤团聚体粒径组成基本以 >0.25 mm 粒径团聚体为主（表 3），这与诸多学者研究结果相似<sup>[12-14,23-24]</sup>，与王富华等<sup>[25]</sup>关于亚热带 4 种典型林分的研究结果不同，可能是由于土壤本身性质和林分特征不同。随海拔升高，相同林分类型土壤团聚体组成呈现由大粒径向微团聚体 (<0.25 mm) 转变趋势（表 1、3），这与吴梦瑶等<sup>[13]</sup>研究贺兰山的结果相反，其原因可能是受城市化程度、气候和林分因素等的影响较大<sup>[19,24]</sup>，海拔因素影响的温度差别不大。机械稳定性团聚体与水稳性团聚体在粒径组成比例上存在较大差异，这与团聚体破裂方式和强度的不同有关<sup>[26]</sup>。土壤团聚体粒径分布受城乡梯度和植被类型的影响，根本上是受土壤肥力和植物根系、微生物等的影响。越来越多研究表明，亚热带森林土壤大团聚体及其有机碳含量对团聚体稳定性的贡献较大<sup>[25]</sup>。可见，提高大团聚体含量比例，有助于森林土壤维持团聚结构的稳定和提高碳固持的能力。

本文关于不同林分类型土壤团聚体稳定性分析结果与鲍国涛等<sup>[27]</sup>和王富华等<sup>[25]</sup>基本一致。综合团聚体稳定性评价指标 ( $MWD$ 、 $GMD$ 、 $R_{0.25}$ ) 可知，针阔混交林表现规律明显，呈现其土壤团聚体的水稳定性随城乡梯度递进有降低趋势。各梯度连贯土壤团聚体稳定性（机械稳定性与水稳性）呈现规律不一致，随土层增加而显著降低 ( $P < 0.05$ ，近郊梯度下针阔混交林和常绿阔叶林除外)，这与其他学者<sup>[15,25,28-29]</sup>研究结果相似。城市化可能对城区和乡村梯度下马尾松林和针阔混交林土壤质量影响较大，土壤团聚体水稳性受多因素综合影响。其原

因可能有：（1）城乡梯度环境受氮沉降、酸沉降以及“城市热岛”效应等综合影响，植被的生境有较大差异，对土壤功能和性状影响是多尺度多方面的；（2）森林土壤性状可能受人为因素的影响大于自然因素，同时受林分特征差异的影响。人们在常绿阔叶林中进行经济活动（如采挖中草药）对土壤进行了严重扰动，造成水土流失，降低了土壤质量，且不同地形中坡度有所差异，导致受干扰或侵蚀的程度不同；（3）马尾松林生态系统较脆弱，表现出群落层次结构简单，而针阔混交林具有较高的土壤肥力和较复杂的群落层次，常绿阔叶林作为南亚热带中顶级演替群落，其林分结构更高<sup>[12]</sup>，物种多样性更高<sup>[30]</sup>，具有更多的养分资源，团聚体稳定性更高。实际情况下，土壤团聚体稳定性受地形、气候类型、降雨量等多因素综合影响；（4）pH 值显著影响团聚体稳定性<sup>[31]</sup>。pH 值主要决定了细菌的分布，气候变化相关的森林土壤酸化可能影响了土壤细菌群落组成与功能<sup>[32]</sup>，转而对有机质的分解与转化过程产生重要影响，较低 pH 值促进土壤团聚体形成与保持稳定性过程。

### 4.2 土壤团聚体稳定性与土壤理化性质关系

有研究认为，SOC 是影响团聚体在不同海拔植被下分布及稳定性的最主要因素<sup>[13]</sup>，但本研究结果发现：TN 对森林土壤 0~10 cm 土层团聚体稳定性影响解释更强，SOC 对 10~30 cm 土层团聚体稳定性的影响解释更强。综合土层看，TN 是影响团聚体在城乡梯度下不同林分类型中分布及稳定性的关键因素。结合生态化学计量学理论<sup>[33]</sup>，这可能是由于研究区域处于氮沉降日趋严重的环境下，城乡梯度下的 3 种森林生态系统主要受磷限制，且城市化加剧森林生态系统的磷限制<sup>[34]</sup>，对土壤微生物产生负面影响；而土壤 TN 含量的增加降低了土壤 pH 值，与土壤酸性磷酸酶活性的增加呈正相关，长期氮沉降缓解了磷的限制<sup>[35]</sup>，以致微生物群落组成及多样性发生变化以适应 P 限制，进而影响土壤有机质的分解与转化。亚热带地区降雨量较大，森林土壤受水力侵蚀较严重，土壤侵蚀对大团聚体有较大影响，受侵蚀的部位土壤内裹挟的微团聚体被水流转移及较大粒径团聚体被冲散，加上上下层土的稀释作用，SOC 含量具有表聚效应，导致侵蚀部位土层中 SOC 减少<sup>[23,36]</sup>，以致 10~30 cm 土层结构稳定较 0~10 cm 土层更受 SOC 含量影响。本研究结果表明：机械稳定性和水稳性团聚体

的  $D_m$  与  $PAD$  呈正相关, 与  $MWD$ 、 $GMD$  呈负相关, 这与吴梦瑶等<sup>[13]</sup> 研究结果相似。由此可见, 土壤碳氮的累积可能直接促进了土壤大团聚体的形成及其稳定性<sup>[37]</sup>。

## 5 结论

(1) 城乡梯度下 3 种林分类型土壤团聚体组成以大团聚体 ( $>0.25$  mm) 为主。针阔混交林土壤团聚体稳定性 (机械稳定性和水稳性) 随城乡梯度递进呈降低趋势, 说明城市化能促进针阔混交林土壤团聚体稳定性的增加。城乡梯度下 3 种林分类型土壤团聚体的水稳性基本随土层深度增加而降低, 而其机械稳定性与之相反。

(2) 较土层深度, 城乡梯度与林分类型对土壤团聚体分布及稳定性影响更显著。城乡梯度下不同林分类型土壤团聚体的水稳性与  $SOC$ 、 $TN$ 、 $TP$  等呈正相关, 与  $pH$  值、微团聚体 ( $<0.25$  mm) 含量呈负相关。影响土壤团聚体在城乡梯度下不同林分类型中分布及其稳定性的主要因素有  $SOC$ 、 $TN$ 、 $pH$  值等,  $TN$  是关键影响因素。

## 参考文献:

[1] 杨士弘. 珠江三角洲城市化对生态环境的影响及持续发展对策[J]. 华南师范大学学报:自然科学版, 1999 (3): 74-81.

[2] 赵方凯, 杨 磊, 陈利顶, 等. 城郊生态系统土壤安全: 问题与挑战[J]. 生态学报, 2018, 38 (12): 4109-4120.

[3] 谢 天, 侯 鹰, 陈卫平, 等. 城市化对土壤生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39 (4): 1154-1164.

[4] 邵鹏帅, 解宏图, 鲍雪莲, 等. 森林次生演替和土壤层次对微生物群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39 (5): 1455-1463.

[5] 符方艳, 陆宏芳. 城市化对亚热带常绿阔叶林土壤生物群落结构的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24 (6): 938-946.

[6] 牛晓燕, 刘志强, 赵晶晶, 等. 大兴安岭森林火烧后不同演替阶段土壤细菌多样性动态[J]. 微生物学通报, 2017, 44 (8): 1825-1833.

[7] 赵友朋, 孟苗婧, 张金池, 等. 不同林地类型土壤团聚体稳定性与铁铝氧化物的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38 (4): 75-81.

[8] 刘世荣, 代力民, 温远光, 等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望[J]. 生态学报, 2015, 35 (1): 1-9.

[9] 刘 艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. 土壤, 2018, 50 (5): 853-865.

[10] 刘 强, 穆兴民, 高 鹏, 等. 土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J]. 水土保持研究, 2020, 27 (6): 386-392.

[11] Aksakal E L, Angin I, Sari S. A new approach for calculating aggregate stability: Mean weight aggregate stability (MWAS)[J]. CATENA, 2020, 194: 104708.

[12] Qiao X X, Wang C, Feng M C, et al. Hyperspectral response and quantitative estimation on soil aggregate characters[J]. CATENA, 2021, 202: 105286.

[13] 吴梦瑶, 陈 林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (2): 210-216.

[14] 唐 贤, 黄伟濠, 卢 瑛, 等. 广东省赤红壤区土壤团聚体有机碳和铁氧化物特征及稳定性[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (2): 200-209.

[15] 喻国军, 谢晓尧. 喀斯特地区造林对土壤团聚体稳定性及微生物碳代谢活性的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27 (6): 21-27,36.

[16] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述[J]. 生态学报, 2012, 32 (22): 7177-7189.

[17] Fang Y, Yoh M, Koba K, et al. Nitrogen deposition and forest nitrogen cycling along an urban-rural transect in southern China[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 872-885.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[19] 黎宏祥. 喀斯特地区不同林分土壤团聚体稳定性及其有机碳特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[20] 于法展, 张 茜, 张忠启, 等. 庐山不同森林植被对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (6): 15-19.

[21] Six J C S U, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America journal, 1998, 62(5): 1367-1377.

[22] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报, 2008, 45 (3): 413-419.

[23] 孙筱璐, 唐佐忠, 尤业明, 等. 气候和林分类型对土壤团聚体有机碳的影响[J]. 广西植物, 2018, 38 (3): 341-351.

[24] Herrmann D L, Schifman L A, Shuster W D. Urbanization drives convergence in soil profile texture and carbon content[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(11): 114001.

[25] 王富华, 吕 盛, 黄 容, 等. 缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2019, 40 (3): 1504-1511.

[26] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9 (3): 106-113.

[27] 鲍国涛. 辽宁东部林区不同林分类型土壤团聚体稳定性研究[J]. 防护林科技, 2020 (12): 12-14.

[28] 林立文, 邓羽松, 王金悦, 等. 南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31 (11): 3647-3656.

[29] 庄 正, 张 芸, 张 颖, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (6): 183-188.

[30] 潘 高. 南方红壤丘陵区3种森林群落物种多样性及生态位研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.

[31] 徐海东, 苑海静, 熊 静, 等. 杉阔异龄复层林对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响[J]. 林业科学研究, 2020, 33 (3): 107-115.

[32] Ni Y Y, Yang T, Ma Y Y, et al. Soil pH determines bacterial distribution and assembly processes in natural mountain forests of eastern China[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30: 2164-2177.

[33] 邢 伟, 吴昊平, 史 俏, 等. 生态化学计量学理论的应用、完善与扩展[J]. 生态科学, 2015, 34 (1): 190-197.

[34] Huang J, Liu J, Zhang W, et al. Effects of urbanization on plant phosphorus availability in broadleaf and needleleaf subtropical forests[J]. Science of The Total Environment, 2019, 684(20): 50-57.

- [35] Chen J, Groenigen K J, Hungate B A, *et al.* Long - term nitrogen loading alleviates phosphorus limitation in terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(9): 5077-5086.
- [36] 马 帅. 黄土高原次生林区植被恢复过程中土壤结构与土壤有机碳特征研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2011.
- [37] 张 芸, 李惠通, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤有机质特征及团聚体稳定性[J]. *生态学杂志*, 2016, 35 ( 8 ): 2029-2037.

## Distribution and Stability of Soil Aggregates in Different Forest Types Under an Urban-rural Gradient

YANG Hong-bing<sup>1,2</sup>, XIAO Yi-hua<sup>1</sup>, XU Han<sup>1</sup>, HUANG Zi-jun<sup>1,3</sup>,  
LI Ming<sup>1</sup>, GUO Xiao-min<sup>2</sup>, YOU Hui-min<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 2. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China; 3. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the effects of urban-rural gradient and forest stand type on the fractions of forest soil aggregates and their stability mechanisms and provide a theoretical basis for the elucidation of regional soil quality assessment. [Methods] Three typical forest stand types under the urban-rural gradient of the Pearl River Delta urban agglomerates were selected to analyze the characteristics of the stability of soil aggregates in the 0-30 cm soil layer, as well as their influencing factors. [Results] The soil aggregates of the three forest types mainly consisted of large aggregates (> 0.25 mm). The water-stable aggregates of *pinus massoniana* forest (PF) and mixed coniferous and broad-leaved forest (MF) showed a shift from large size to micro aggregates (< 0.25 mm), but the evergreen broad-leaved forest (BF) showed a shift from large size to micro aggregates (< 0.25 mm). There was no significant trend in the proportion of soil agglomerates with grain size in evergreen broad-leaved forest (BF). The mean weight diameter (*MWD*) and geometric mean diameter (*GMD*) of soil water-stable agglomerates tended to increase and then decrease with PF to MF to BF in urban area, increase in suburban area, and decrease and then increase in rural area. The mass fractal dimension ( $D_m$ ) and the aggregate processing damage rate (*PAD*) of the agglomerates showed opposite comparing with *MWD* and *GMD*. The stability (mechanical stability and water stability) of soil aggregates under the suburban gradient increased with the progression of PF–MF–BF. The stability of soil aggregates in the mixed coniferous and broad-leaved forest showed a trend of urban > suburban > rural on the gradient. With the increase of soil depth, the water stability of soil aggregates in the three stands with different gradients decreased, while their mechanical stability increased. Soil aggregate water stability was positively correlated with soil density, water content, and organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) content. But it was negatively correlated with pH and micro agglomerate content. The redundancy analysis showed that the distribution and stability of soil agglomerates under the different stand types and the urban-rural gradient were mainly influenced by the OC, TN, TP, and pH. And TN was the dominant factor. [Conclusion] The soil agglomeration structure stability is closely related to urban-rural gradient, stand type, and soil layer. The transformation of *pinus massoniana* forest into mixed coniferous and broad-leaved forest can effectively improve the forest soil quality and erosion resistance.

**Keywords:** Pearl River Delta (PRD); urban-rural gradient; forest stand type; aggregate stability; macro aggregates