附录1　不同土地利用类型下土壤生物群落(细菌、真菌、原生动物和线虫)全共现网络的关键拓扑属性

Appendix 1　Key topological properties of the complete co-occurrence network of soil biological communities (bacteria, fungi, protozoa and nematodes) under different land use types

生物类群 Organism	土地利用类型 Land-use type	节点数 Nodes	连接数 Edges	平均度 Average degree	网络密度 Density	平均路径长度 Average path length	网络直径 Diameter	聚类系数 Clustering coefficient	模块度 Modularity
细菌 Bacteria	原生林 PF	897	4,093	9.126	0.0102	5.4053	19	0.6442	0.7559
细菌 Bacteria	次生林 SF	1,007	7,216	14.3317	0.0142	7.1728	28	0.5177	0.5914
细菌 Bacteria	开阔生境 OB	950	7,902	16.6358	0.0175	6.4246	25	0.7768	0.7306
细菌 Bacteria	橡胶林 XJ	731	1,287	3.5212	0.0048	8.7146	30	0.4868	0.8632
真菌 Fungi	原生林 PF	453	927	4.0927	0.0091	1.308	7	0.9619	0.9397
真菌 Fungi	次生林 SF	376	943	5.016	0.0134	2.5033	11	0.9583	0.9249
真菌 Fungi	开阔生境 OB	393	1,112	5.659	0.0144	1.7899	8	0.9779	0.8483
真菌 Fungi	橡胶林 XJ	315	401	2.546	0.0081	1.0867	5	0.9845	0.962
原生动物 Protozoa	原生林 PF	278	779	5.6043	0.0202	1.2497	6	0.9388	0.9246
原生动物 Protozoa	次生林 SF	164	483	5.8902	0.0361	1.0382	3	0.9956	0.8473
原生动物 Protozoa	开阔生境 OB	210	582	5.5429	0.0265	1.2171	4	0.9755	0.9089
原生动物 Protozoa	橡胶林 XJ	96	160	3.3333	0.0351	1.0244	2	0.9953	0.8009
线虫 Nematoda	原生林 PF	124	463	7.4677	0.0607	1.0191	3	0.9988	0.8215
线虫 Nematoda	次生林 SF	70	193	5.5143	0.0799	1.0153	2	0.9978	0.7814
线虫 Nematoda	开阔生境 OB	108	501	9.2778	0.0867	1.1401	3	0.9453	0.8355
线虫 Nematoda	橡胶林 XJ	72	304	8.4444	0.1189	1.0000	1	1.0000	0.6118

PF: 原生林; SF: 次生林; OB: 开阔生境; XJ: 橡胶林。

PF, Primary forest; SF, Secondary forest; OB, Open habitat; XJ, Rubber plantation.

附录2　四类土壤生物群落的网络巢式度(Nestedness)分析结果

Appendix 2　Network nestedness for four types of soil biotic communities

生物类群 Organism	NODF值 NODF value	*Z*值 *Z* value	*P*值 *P* value	结构类型 Structure type
细菌 Bacteria	86.12	−3.43	0	反巢式/分隔型 Anti-nested/segregated
真菌 Fungi	35.93	−6.88	0	反巢式/分隔型 Anti-nested/segregated
原生动物 Protozoa	29.68	−6.52	0	反巢式/分隔型 Anti-nested/segregated
线虫 Nematoda	13.4	−7.98	0	反巢式/分隔型 Anti-nested/segregated

NODF表示基于重叠度和递减填充的巢式度指标。*Z*值小于0且$P < 0.05$, 表明观测网络的巢式度显著低于随机期望, 呈反巢式或分隔型结构。

NODF denotes the nestedness metric based on overlap and decreasing fill. Negative *Z* values with $P < 0.05$ indicate that the observed network nestedness is significantly lower than the null-model expectation, representing an anti-nested or segregated structure.

附录3　不同土地利用类型下各生物类群主要优势门/属相对丰度的非参数检验结果(Kruskal-Wallis test)
Appendix 3　Non-parametric test results (Kruskal-Wallis test) of the relative abundances of dominant phyla/genera across different land use types for each biological group

生物类群 Biological group	分类单元 Taxon	土地利用类型 Land-use type	显著性分组 Significance group
细菌 Bacteria	酸杆菌门 Acidobacteria	原生林 PF	ns
细菌 Bacteria	酸杆菌门 Acidobacteria	次生林 SF	ns
细菌 Bacteria	酸杆菌门 Acidobacteria	开阔生境 OB	ns
细菌 Bacteria	酸杆菌门 Acidobacteria	橡胶林 XJ	ns
细菌 Bacteria	放线菌门 Actinobacteria	原生林 PF	ns
细菌 Bacteria	放线菌门 Actinobacteria	次生林 SF	ns
细菌 Bacteria	放线菌门 Actinobacteria	开阔生境 OB	ns
细菌 Bacteria	放线菌门 Actinobacteria	橡胶林 XJ	ns
细菌 Bacteria	厚壁菌门 Firmicutes	原生林 PF	a
细菌 Bacteria	厚壁菌门 Firmicutes	次生林 SF	a
细菌 Bacteria	厚壁菌门 Firmicutes	开阔生境 OB	a
细菌 Bacteria	厚壁菌门 Firmicutes	橡胶林 XJ	a
细菌 Bacteria	硝化螺旋菌门 Nitrospirae	原生林 PF	a
细菌 Bacteria	硝化螺旋菌门 Nitrospirae	次生林 SF	ab
细菌 Bacteria	硝化螺旋菌门 Nitrospirae	开阔生境 OB	ab
细菌 Bacteria	硝化螺旋菌门 Nitrospirae	橡胶林 XJ	b
细菌 Bacteria	变形菌门 Proteobacteria	原生林 PF	ns
细菌 Bacteria	变形菌门 Proteobacteria	次生林 SF	ns
细菌 Bacteria	变形菌门 Proteobacteria	开阔生境 OB	ns
细菌 Bacteria	变形菌门 Proteobacteria	橡胶林 XJ	ns
真菌 Fungi	子囊菌门 Ascomycota	原生林 PF	ns
真菌 Fungi	子囊菌门 Ascomycota	次生林 SF	ns
真菌 Fungi	子囊菌门 Ascomycota	开阔生境 OB	ns
真菌 Fungi	子囊菌门 Ascomycota	橡胶林 XJ	ns
真菌 Fungi	担子菌门 Basidiomycota	原生林 PF	ns
真菌 Fungi	担子菌门 Basidiomycota	次生林 SF	ns
真菌 Fungi	担子菌门 Basidiomycota	开阔生境 OB	ns
真菌 Fungi	担子菌门 Basidiomycota	橡胶林 XJ	ns
真菌 Fungi	壶菌门 Chytridiomycota	原生林 PF	a
真菌 Fungi	壶菌门 Chytridiomycota	次生林 SF	a
真菌 Fungi	壶菌门 Chytridiomycota	开阔生境 OB	a
真菌 Fungi	壶菌门 Chytridiomycota	橡胶林 XJ	a
真菌 Fungi	毛霉菌门 Mucoromycota	原生林 PF	ns
真菌 Fungi	毛霉菌门 Mucoromycota	次生林 SF	ns
真菌 Fungi	毛霉菌门 Mucoromycota	开阔生境 OB	ns
真菌 Fungi	毛霉菌门 Mucoromycota	橡胶林 XJ	ns
真菌 Fungi	隐真菌门 Rozellomycota	原生林 PF	ns
真菌 Fungi	隐真菌门 Rozellomycota	次生林 SF	ns
真菌 Fungi	隐真菌门 Rozellomycota	开阔生境 OB	ns
真菌 Fungi	隐真菌门 Rozellomycota	橡胶林 XJ	ns
线虫 Nematoda	异色矛属 *Achromadora*	原生林 PF	ns
线虫 Nematoda	异色矛属 *Achromadora*	次生林 SF	ns

生物类群 Biological group	分类单元 Taxon	土地利用类型 Land-use type	显著性分组 Significance group
线虫 Nematoda	异色矛属 *Achromadora*	开阔生境 OB	ns
线虫 Nematoda	异色矛属 *Achromadora*	橡胶林 XJ	ns
线虫 Nematoda	刺嘴纲未分类类群 Enoplea_XX	原生林 PF	ns
线虫 Nematoda	刺嘴纲未分类类群 Enoplea_XX	次生林 SF	ns
线虫 Nematoda	刺嘴纲未分类类群 Enoplea_XX	开阔生境 OB	ns
线虫 Nematoda	刺嘴纲未分类类群 Enoplea_XX	橡胶林 XJ	ns
线虫 Nematoda	等齿属 *Miconchus*	原生林 PF	ns
线虫 Nematoda	等齿属 *Miconchus*	次生林 SF	ns
线虫 Nematoda	等齿属 *Miconchus*	开阔生境 OB	ns
线虫 Nematoda	等齿属 *Miconchus*	橡胶林 XJ	ns
线虫 Nematoda	丝尾属 *Oxydirus*	原生林 PF	ns
线虫 Nematoda	丝尾属 *Oxydirus*	次生林 SF	ns
线虫 Nematoda	丝尾属 *Oxydirus*	开阔生境 OB	ns
线虫 Nematoda	丝尾属 *Oxydirus*	橡胶林 XJ	ns
线虫 Nematoda	针属 *Paratylenchus*	原生林 PF	ns
线虫 Nematoda	针属 *Paratylenchus*	次生林 SF	ns
线虫 Nematoda	针属 *Paratylenchus*	开阔生境 OB	ns
线虫 Nematoda	针属 *Paratylenchus*	橡胶林 XJ	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–顶复门 Alveolata–Apicomplexa	原生林 PF	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–顶复门 Alveolata–Apicomplexa	次生林 SF	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–顶复门 Alveolata–Apicomplexa	开阔生境 OB	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–顶复门 Alveolata–Apicomplexa	橡胶林 XJ	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–纤毛虫门 Alveolata–Ciliophora	原生林 PF	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–纤毛虫门 Alveolata–Ciliophora	次生林 SF	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–纤毛虫门 Alveolata–Ciliophora	开阔生境 OB	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–纤毛虫门 Alveolata–Ciliophora	橡胶林 XJ	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–甲藻门 Alveolata–Dinoflagellata	原生林 PF	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–甲藻门 Alveolata–Dinoflagellata	次生林 SF	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–甲藻门 Alveolata–Dinoflagellata	开阔生境 OB	ns
原生动物 Protozoa	囊泡虫类–甲藻门 Alveolata–Dinoflagellata	橡胶林 XJ	ns
原生动物 Protozoa	根足类–丝足虫门 Rhizaria–Cercozoa	原生林 PF	ns
原生动物 Protozoa	根足类–丝足虫门 Rhizaria–Cercozoa	次生林 SF	ns
原生动物 Protozoa	根足类–丝足虫门 Rhizaria–Cercozoa	开阔生境 OB	ns
原生动物 Protozoa	根足类–丝足虫门 Rhizaria–Cercozoa	橡胶林 XJ	ns
原生动物 Protozoa	不等鞭毛类–Gyrista类群 Stramenopiles–Gyrista	原生林 PF	ns
原生动物 Protozoa	不等鞭毛类–Gyrista类群 Stramenopiles–Gyrista	次生林 SF	ns
原生动物 Protozoa	不等鞭毛类–Gyrista类群 Stramenopiles–Gyrista	开阔生境 OB	ns
原生动物 Protozoa	不等鞭毛类–Gyrista类群 Stramenopiles–Gyrista	橡胶林 XJ	ns

不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$, Dunn's test with BH correction); ns表示无显著差异

Different letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$, Dunn's test with Benjamini-Hochberg correction). "ns" denotes no significant difference.

附录4　不同土地利用方式下4种土壤微食物网组分Alpha多样性指数(Richness和Shannon指数)的直接比较。
Appendix 4　Direct comparison of alpha diversity indices (Richness and Shannon) among four soil micro-food web components across different land-use types.

土地利用类型 Land-use type	生物类群 Biological group	丰富度 Richness	Shannon指数 Shannon index
原生林 PF	细菌 Bacteria	944.78 ± 198.41^{a}	5.94 ± 0.51^{a}
原生林 PF	真菌 Fungi	266.00 ± 89.45^{b}	3.97 ± 0.69^{b}
原生林 PF	原生动物 Protozoa	24.67 ± 13.95^{c}	2.07 ± 0.68^{c}
原生林 PF	线虫 Nematoda	170.44 ± 102.12^{b}	4.26 ± 0.57^{b}
次生林 SF	细菌 Bacteria	936.00 ± 191.10^{a}	6.08 ± 0.40^{a}
次生林 SF	真菌 Fungi	206.89 ± 63.57^{ab}	3.56 ± 1.03^{b}
次生林 SF	原生动物 Protozoa	12.67 ± 8.92^{c}	1.59 ± 0.67^{c}
次生林 SF	线虫 Nematoda	100.22 ± 42.93^{bc}	3.69 ± 0.61^{b}
开阔生境 OB	细菌 Bacteria	792.44 ± 195.15^{a}	5.55 ± 0.43^{a}
开阔生境 OB	真菌 Fungi	205.89 ± 68.00^{b}	3.93 ± 0.58^{b}
开阔生境 OB	线虫 Nematoda	20.67 ± 11.07^{c}	2.06 ± 0.62^{c}
开阔生境 OB	原生动物 Protozoa	130.00 ± 63.06^{b}	4.01 ± 0.59^{b}
橡胶林 XJ	细菌 Bacteria	1,081.33 ± 45.11^{a}	6.38 ± 0.10^{a}
橡胶林 XJ	真菌 Fungi	226.33 ± 47.59^{ab}	3.43 ± 0.77^{b}
橡胶林 XJ	线虫 Nematoda	13.11 ± 8.67^{c}	1.79 ± 0.54^{c}
橡胶林 XJ	原生动物 Protozoa	82.00 ± 42.89^{bc}	3.25 ± 1.14^{b}

数值以均值 ± 标准差表示。小写字母表示在同一土地利用方式下, 四大生物类群(细菌、真菌、原生动物和线虫)之间存在显著差异($P < 0.05$)。考虑到不同界生物数据尺度的巨大差异, 显著性基于非参数Kruskal-Wallis检验及Dunn's事后多重比较(BH校正)确定。PF: 原生林; SF: 次生林; OB: 开阔地; XJ: 橡胶林。
Values are presented as means ± standard deviations. Lowercase letters in parentheses indicate significant differences ($P < 0.05$) among the four biological groups (Bacteria, Fungi, Protozoa, and Nematoda) within the same land-use type. Statistical significance was determined using the non-parametric Kruskal-Wallis test followed by Dunn's post-hoc test with Benjamini-Hochberg (BH) correction, accounting for the large differences in data scale across different organismal kingdoms. PF, Primary forest; SF, Secondary forest; OB, Open habitat; XJ, Rubber plantation.

附录5 环境因子对不同生物类群群落结构的全局Mantel检验结果

Appendix 5 Global Mantel test results relating environmental factors to the community structure of different biological groups

生物类群 Biological group	环境因子 Environmental factor	Mantel *r*	*P*	显著性 Significance
细菌 Bacteria	土壤pH Soil pH	0.36	0	**
细菌 Bacteria	土壤湿度 Soil moisture	0	0	**
细菌 Bacteria	总孔隙度 Total porosity	0.222	0	**
细菌 Bacteria	总钾 Total potassium	0.151	0	**
细菌 Bacteria	有机碳 Organic carbon	0.141	0.006	**
细菌 Bacteria	土壤容重 Bulk density	0.14	0.009	**
细菌 Bacteria	粗砂粒 Coarse sand 200–2,000 μm	0.118	0	*
细菌 Bacteria	总氮 Total nitrogen	0.097	0.039	*
细菌 Bacteria	林冠密度 Canopy density	0.083	0.041	*
细菌 Bacteria	土壤颗粒密度 Soil particle density	0.076	0.09	ns
细菌 Bacteria	粉粒 Silt 2–20 μm	0.066	0.111	ns
细菌 Bacteria	总磷 Total phosphorus	0.06	0.121	ns
细菌 Bacteria	土壤温度 Soil temperature	0.049	0.098	ns
细菌 Bacteria	粘粒 Clay 0–2 μm	0.04	0.229	ns
细菌 Bacteria	土壤含水量 Soil water content	0.037	0.178	ns
细菌 Bacteria	细砂粒 Fine sand 20–200 μm	0.032	0.225	ns
真菌 Fungi	土壤pH Soil pH	0.296	0.001	**
真菌 Fungi	土壤湿度 Soil moisture	0.251	0.002	**
真菌 Fungi	总钾 Total potassium	0.24	0.006	**
真菌 Fungi	粗砂粒 Coarse sand 200–2,000 μm	0.188	0.016	*
真菌 Fungi	总孔隙度 Total porosity	0.12	0.128	ns
真菌 Fungi	细砂粒 Fine sand 20–200 μm	0.12	0.044	*
真菌 Fungi	土壤颗粒密度 Soil particle density	0.1	0.143	ns
真菌 Fungi	土壤容重 Bulk density	0.097	0.128	ns
真菌 Fungi	粘粒 Clay 0–2 μm	0.087	0.182	ns
真菌 Fungi	粉粒 Silt 2–20 μm	0.082	0.184	ns
真菌 Fungi	土壤含水量 Soil water content	0.057	0.195	ns
真菌 Fungi	总磷 Total phosphorus	0.037	0.309	ns
真菌 Fungi	林冠密度 Canopy density	0.035	0.213	ns
真菌 Fungi	有机碳 Organic carbon	0.017	0.393	ns
真菌 Fungi	土壤温度 Soil temperature	−0.021	0.607	ns
真菌 Fungi	总氮 Total nitrogen	−0.089	0.854	ns
原生动物 Protozoa	土壤pH Soil pH	0.299	0.001	**
原生动物 Protozoa	土壤湿度 Soil moisture	0.254	0.001	**
原生动物 Protozoa	总钾 Total potassium	0.13	0.064	ns
原生动物 Protozoa	总磷 Total phosphorus	0.114	0.082	ns
原生动物 Protozoa	粗砂粒 Coarse sand 200–2,000 μm	0.105	0.058	ns
原生动物 Protozoa	总孔隙度 Total porosity	0.087	0.153	ns
原生动物 Protozoa	土壤容重 Bulk density	0.082	0.134	ns
原生动物 Protozoa	粉粒 Silt 2–20 μm	0.069	0.19	ns
原生动物 Protozoa	土壤温度 Soil temperature	0.065	0.112	ns
原生动物 Protozoa	粘粒 Clay 0–2 μm	0.05	0.268	ns

生物类群 Biological group	环境因子 Environmental factor	Mantel *r*	*P*	显著性 Significance
原生动物 Protozoa	细砂粒 Fine sand 20–200 μm	0.048	0.212	ns
原生动物 Protozoa	有机碳 Organic carbon	0.045	0.247	ns
原生动物 Protozoa	土壤含水量 Soil water content	0.011	0.398	ns
原生动物 Protozoa	土壤颗粒密度 Soil particle density	0.007	0.478	ns
原生动物 Protozoa	总氮 Total nitrogen	0.005	0.467	ns
原生动物 Protozoa	林冠密度 Canopy density	−0.016	0.649	ns
线虫 Nematoda	总氮 Total nitrogen	0.181	0.012	*
线虫 Nematoda	有机碳 Organic carbon	0.174	0.008	**
线虫 Nematoda	土壤pH Soil pH	0.148	0.025	*
线虫 Nematoda	土壤湿度 Soil moisture	0.141	0.018	*
线虫 Nematoda	总磷 Total phosphorus	0.119	0.068	ns
线虫 Nematoda	粉粒 Silt 2–20 μm	0.049	0.268	ns
线虫 Nematoda	粘粒 Clay 0–2 μm	0.046	0.278	ns
线虫 Nematoda	土壤颗粒密度 Soil particle density	0.022	0.36	ns
线虫 Nematoda	粗砂粒 Coarse sand 200–2,000 μm	−0.002	0.526	ns
线虫 Nematoda	土壤温度 Soil temperature	−0.006	0.533	ns
线虫 Nematoda	细砂粒 Fine sand 20–200 μm	−0.017	0.556	ns
线虫 Nematoda	林冠密度 Canopy density	−0.020	0.667	ns
线虫 Nematoda	总钾 Total potassium	−0.023	0.605	ns
线虫 Nematoda	总孔隙度 Total porosity	−0.039	0.676	ns
线虫 Nematoda	土壤含水量 Soil water content	−0.053	0.817	ns
线虫 Nematoda	土壤容重 Bulk density	−0.061	0.791	ns

该分析整合了所有36个样本, 旨在评估环境因子在整个土地利用梯度上的总体驱动作用。相关性(*r*)和显著性(*P*)基于Spearman相关系数和999次置换检验计算得出。显著性水平: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, ns: 无显著差异。

This analysis integrates all 36 samples to evaluate the overall driving effect of environmental factors across the entire land-use gradient. Correlation (*r*) and significance (*P*) were calculated based on Spearman correlation and 999 permutations. Significance levels: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$; ns, No significant difference.