

中国东部海岛森林和灌丛土壤碳氮磷养分库的纬度变化

妥彬^{1,2} 田文斌² 郭超^{1,2} 许洛山^{1,2} 郑丽婷^{1,2} 苏田^{1,2} 刘翔宇^{1,2} 阎恩荣^{1,2*}

(¹华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; ²浙江普陀山森林生态系统定位观测研究站, 浙江舟山 316100)

摘要 虽然海岛结构相对简单,但在生物多样性和生态功能维持方面起重要作用.以中国东部暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带的14个海岛为对象,研究森林土壤碳和氮磷养分库的纬度变化特征,并分析其与气候因子和植物多样性的关系.结果表明:土壤碳和氮磷养分库在温度带间差异显著,土壤碳库与氮库在暖温带最低,分别为49.35和1.08 t·hm⁻²,在北亚热带最高,为137.25和4.63 t·hm⁻²;磷库在南亚热带海岛最低,为1.3 t·hm⁻²,在北亚热带最高,为5.19 t·hm⁻².各植被类型土壤碳氮磷库在不同温度带间存在显著差异,落叶林土壤碳氮磷库在亚热带高于暖温带;常绿阔叶林土壤碳和氮库不受温度带影响,磷库在北亚热带和中亚热带显著高于南亚热带.年均温、年降水量、土壤含水量和植物物种多样性间的交互作用对土壤碳氮磷库有显著正向影响;植物物种多样性对土壤氮库变化有正向影响,但对磷库具有负向影响.海岛森林土壤碳库的纬度变化趋势与大陆相反,土壤氮磷养分库变化格局与大陆相似;其中,水热和植物物种多样性是驱动中国东部海岛森林土壤碳氮磷库变化的主要非生物和生物因素.

关键词 年均温; 年降水; 植被类型; 物种多样性; 温度带; 东海; 黄海

Latitudinal variation in soil carbon, nitrogen and phosphorus pools across island forests and shrublands in eastern China. TUO Bin^{1,2}, TIAN Wen-bin², GUO Chao^{1,2}, XU Ming-shan^{1,2}, ZHENG Li-ting^{1,2}, SU Tian^{1,2}, LIU Xiang-yu^{1,2}, YAN En-rong^{1,2*} (¹*School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China*; ²*Putuo Forest Ecosystem Research and Observation Station, Zhoushan 316100, Zhejiang, China*).

Abstract: Despite its monotonous structure, sea-island plays a crucial role in sustaining biodiversity and ecosystem functioning. The objectives of this study were to explore the altitudinal variation of soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) pools in forests across 14 islands spanning temperate zone (TZ), northern subtropical zone (NSZ), mid-subtropical zone (MSZ), and southern subtropical zone (SSZ) in eastern China. The relationships of soil C and nutrient pools with climatic factors and plant species diversity were examined across islands. Our results showed that soil C, N and P pools differed significantly across climatic zones. Soil C and N pools were the lowest in TZ (49.35 and 1.08 t·hm⁻²) and the highest in NSZ (137.25 and 4.63 t·hm⁻²). Soil P pool was the lowest in SSZ (1.3 t·hm⁻²) and the highest in NSZ (5.19 t·hm⁻²). There were significant difference in soil C, N and P pools among vegetation types. Soil C, N and P pools in deciduous forests were significantly higher in subtropical than in temperate islands. Soil C and N pools in evergreen broadleaved forests did not differ among sub-climatic zones, and soil P pool was lower in SSZ than that in NSZ and MSZ. The interactions across mean annual temperature, mean annual precipitation, soil water content, and plant species diversity positively affected latitudinal variation in soil C, N, and P pools. Plant species diversity positively associated with soil N pool, but negatively linked with soil P pool. In conclusion, the latitudinal trend of soil C pool is different, but that of

本文由舟山市科技计划项目(2016C31031)、国家自然科学基金项目(31770467)和国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201505009)资助. This work was supported by the Sci-Tech Plan Program of Zhoushan City (2016C31031), the National Natural Science Foundations of China (31770467), and the Special Found for National Oceanic Administration in the Public Interest (201505009).

2019-01-17 Received, 2019-06-14 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

soil N and P pools are identical between sea-island and mainland. The main abiotic and biotic drivers of soil C, N and P pools are water availability, temperature and plant species diversity across sea-islands in eastern China.

Key words: annual mean temperature; annual mean precipitation; vegetation type; species diversity; temperature zone; the East China Sea; the Yellow Sea.

森林土壤碳和氮磷养分库不但反映了植被对土壤的改造作用,也反过来影响生态功能^[1-3].土壤是地球表面最大的碳库,储量约为 1400~1500 Pg C,是大气碳储量的 2 倍、植被碳储量的 3 倍^[4].其中,森林土壤固碳量约占全球土壤的 39%^[4],是地球的重要碳汇之一.有研究表明,氮磷养分通过促进植物生长,从而提高土壤的碳固定.土壤氮磷养分库大小在一定程度上决定了森林群落的物种多样性,并影响森林地上和地下生产力与碳积累^[5-7].另一方面,植物养分以凋落物的形式归还土壤,对土壤养分库产生影响^[8-13].不同植物种类的生长速度差异巨大,即使是同一种植物,由于生长环境的不同,其生长速率也显著不同,因而对土壤碳氮磷库的影响程度不同.不同森林群落类型和环境要素的变化在很大程度上决定了土壤碳氮磷库大小的差异^[13-14].例如,由于养分利用策略的差异,落叶植物比常绿植物具有更高的养分含量和凋落物周转率^[5,15-17],从而有利于土壤碳库和养分库积累.此外,大尺度的水热格局差异也会影响森林生态系统碳和氮磷养分的周转与固持.热带水热充足,分解过程快,导致土壤养分归还速率高,温带和寒带则相反.目前,针对我国不同森林生态系统碳库和养分库的研究表明,森林土壤碳库随纬度增加而增加,在北部地区随经度减小而减小^[18];土壤磷库随着降雨量增加而减少^[19].在大尺度上,土壤碳氮磷库的变化格局是纬度、经度和海拔地带性上非生物和生物因素综合影响的结果.目前,关于森林土壤碳库和氮磷养分库随海拔、纬向和经向梯度变化格局的探索多集中在大陆区域,而针对海岛森林土壤碳氮磷库的大尺度变化格局及影响成因研究仍很薄弱.

海岛生态系统既有与大陆相似的方面,又具有其特殊性.我国是海岛大国,拥有 1 万多个大小不同的大陆型岛屿.在东部近岸海域,海岛自北向南分布,形成了典型的纬度地带梯度.这些海岛大部分为基岩岛,以剥蚀丘陵为主要地貌类型,其岛内地形及微气候变异相对较小^[20].一般而言,我国东部海域近大陆海岛的海拔较低(除台湾岛外),经度变幅小,在一定程度上剔除了海拔和经度的影响,简化了

纬度、经度和海拔三向地带性的交互作用,突出了纬度效应,是研究这一特殊生态系统类型随纬度地带变化特征的理想场所.另外,我国东部海岛虽然经历了长期的人类干扰和开发利用,但由于长期孤立和交通不便或者特殊保护等原因,一些岛屿上仍保存着珍贵稀有的海岛型植物群落类型,比如分布于浙江普陀山佛顶山的大片台湾蚊母树(*Distylium gracile*)群落和洛伽山的普陀樟(*Cinnamomum japonicum*)群落等.目前,对这些特殊森林群落结构和功能的研究较少.为此,本研究以我国东部海域纬度梯度上的 14 个海岛为对象,选择各海岛的主要森林和灌丛类型,分析海岛森林土壤碳氮磷库的变化格局,及其生物和非生物影响因素,为揭示海岛这一特殊生态系统的土壤碳循环和养分循环机制提供研究基础.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究选择我国大陆东部黄海和东海海域的 14 个典型海岛(26°55′—37°58′N, 119°16′—122°28′E),从北到南依次为:山东省的北长山岛、南长山岛和庙岛;江苏省的秦山岛;上海市的大金山岛;浙江省的泗礁岛、外马廊岛、梅山岛、鹤浦岛、普陀山岛、朱家尖岛、洛伽山岛;福建省的大屿岛和烽火岛(图 1).14 个海岛跨越了暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带气候类型.年均降雨量从北到南依次递增,山东省岛屿的年均降水量最低,为 544.6 mm,福建省岛屿的年均降水量最高,为 1367.68 mm.年平均气温从山东海岛到福建海岛依次增大,从 12℃ 增加到 20.7℃.14 个岛屿的地理环境及气象信息见表 1,森林群落类型见表 2.

1.2 植被调查、土壤取样和室内测定

2015 年 7 月—2017 年 8 月,以每个海岛的主要森林群落和灌丛类型为研究对象(表 1),建立样方,森林群落样方大小为 20 m×20 m,灌丛样方大小为 10 m×10 m(山东长山岛等温带地区样方大小为 5 m×5 m).群落调查包括样方内的物种数及其多度.土壤样品采集根据梅花桩法,在样方的左上、左下、

表 1 研究区 14 个海岛的分布及气候特征
Table 1 Locality and climate of 14 islands in this study

气候带 Climatic zone	省/市 Province/ city	海岛名称 Island name	纬度 Latitude (°)	经度 Longitude (°)	面积 Area (km ²)	离岸距离 Distance from coast (km)	年均温 Mean annual temperature (°C)	年降水量 Mean annual precipitation (mm)	土壤类型 Soil type
暖温带 Temperate zone	山东 Shandong	北长山岛 Beichangshan Island	37.59	120.42	7.98	14.1	12.0	544.6	棕壤
		南长山岛 Nanchangshan Island	37.55	120.44	13.21	6.7	12.0	544.6	棕壤、褐土
		庙岛 Miao Island	37.56	120.40	1.43	11.5	12.0	544.6	棕壤、褐土
北亚热带 Northern subtropical zone	江苏 Jiangsu	秦山岛 Qinshan Island	34.52	119.16	0.17	6.6	14.5	883.8	棕壤、潮滩盐土
中亚热带 Mid-subtropical zone	上海 Shanghai	大金山岛 Dajinshan Island	30.41	121.25	0.23	6.2	16.6	1181.9	褐土
	浙江 Zhejiang	泗礁岛 Sijiao Island	30.42	122.26	22.66	45.9	16.4	1106.0	红壤土、潮土
		外马廊岛 Waimalang Island	30.40	122.28	0.17	6.9	16.4	1106.0	黄土
		梅山岛 Meishan Island	29.60	121.80	38.30	0.5	16.5	1316.8	黄红壤
		普陀山岛 Putuo Island	30.00	122.23	12.32	25.3	16.6	1290.0	红壤、黄红壤
		洛迦山岛 Luojiashan Island	29.58	122.26	0.38	30.6	16.6	1290.0	红壤
		朱家尖岛 Zhujiajian Island	29.50	122.50	72.00	2.0	16.6	1290.0	红壤、黄红壤
		鹤浦岛 Hepu Island	29.39	122.17	84.38	3.0	16.8	1318.0	红壤、黄红壤
	福建 Fujian	烽火岛 Fenghuo Island	26.55	120.15	2.08	0.3	19.8	1367.7	红壤、潮土
		大屿岛 Dayu Island	25.45	119.67	0.22	2.8	20.7	1299.8	红壤、黄红壤

中、右上、右下 5 个方位设置采样点. 在每个采样点, 除去表层土上的凋落物和植物, 用环刀采集 0 ~ 20 cm 土层土壤样品, 用于测量土壤碳、氮、磷含量, 每个群落采集 5 个土壤样品. 每个岛的样品总数为群落样方数×5.

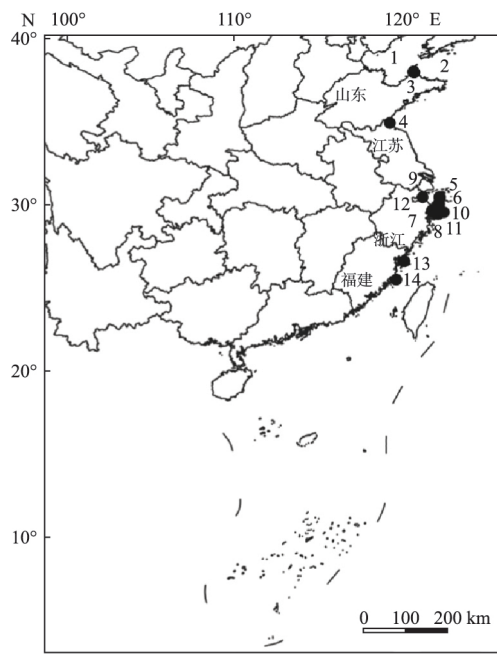


图 1 研究海岛地理位置
Fig.1 Geographic location of the selected islands in this study.
1) 北长山岛 Beichangshan Island; 2) 南长山岛 Nanchangshan Island; 3) 庙岛 Miao Island; 4) 秦山岛 Qinshan Island; 5) 泗礁岛 Sijiao Island; 6) 外马廊岛 Waimalang Island; 7) 梅山岛 Meishan Island; 8) 鹤浦岛 Hepu Island; 9) 大金山岛 Dajinshan Island; 10) 普陀山岛 Putuo Island; 11) 洛迦山岛 Luojiashan Island; 12) 朱家尖岛 Zhujia-jian Island; 13) 烽火岛 Fenghuo Island; 14) 大屿岛 Dayu Island.

土壤样品称鲜重后, 于 105 °C 烘干 72 h 后称干重, 计算土壤含水量和土壤容重. 将土壤样品除根、研磨, 并过 100 目筛待测. 土壤的总碳使用德国 Elementar 总有机碳分析仪测定; 全氮(N)、全磷(P) 测定采用 Smartchem 200 全自动化学分析仪测定.

1.3 土壤碳氮磷库的计算

土壤碳氮磷库($S, t \cdot \text{hm}^{-2}$) 是指单位面积土体内 n 层的土壤容重、元素含量及厚度的加权值之和. 其计算公式为:

$$S = \sum d_n \times \theta_n \times C_n \times (1 - \delta_n \%) / 100 \quad (1)$$

式中: C_n 为土壤碳、氮、磷含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); θ_n 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); d_n 为土壤层厚度(cm); δ_n 为砾石含量(%). 若砾石含量低于 10%, 忽略不计. 由于海岛土层较薄, 本研究的土层厚度设为 20 cm.

1.4 群落物种多样性计算

采用物种多样性指数中的 Shannon 指数(H), 测定群落物种多样性, 其计算公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i \quad (2)$$

式中: P_i 为物种 i 的个体数目占总个体数的百分比; S 为物种总数.

1.5 数据处理

按 14 个海岛的森林和灌丛分类统计土壤碳、氮、磷含量并进行正态性检验. 采用双因素方差分析法(two-way ANOVA) 比较不同海岛、不同群落的土壤碳氮磷含量差异($\alpha = 0.05$). 为探究森林和灌丛土壤碳氮磷库如何随纬度变化, 首先采用单因素方差

分析分别检验各温度带森林和灌丛土壤碳氮磷库的差异;其中,由于北亚热带只有一个灌丛群落,因此未对灌丛进行差异性检验和对比.其次,采用单因素方差分析法比较各温度带间落叶阔叶林、常绿阔叶林、针叶林的土壤养分库差异,同时采用 Tukey 检验进行各水平间均值的配对比较检验.为探究土壤碳氮磷库与纬度和植被类型间的关系,采用广义线性模型,将每个岛土壤的碳氮磷库分别作为响应变量,

年均温、年降水量、土壤含水量及物种多样性作为解释变量.其中,年均温、年降水量及纬度等数据均在距每个海岛最近的气象站获得.统计分析在 R 3.5.1 中完成.使用 Origin 8.1 软件作图.

2 结果与分析

2.1 海岛不同植物群落类型土壤碳氮磷库的变化

如表2所示,海岛空间分布和植被类型对土壤

表2 中国东海和黄海 14 个海岛不同植被群落类型的土壤碳和氮磷养分库

Table 2 Soil carbon, nitrogen and phosphorous pools in different community types across 14 islands in the Yellow Sea and the East China Sea

海岛 Island	群落和灌丛类型 Community and shrub type	碳库 Carbon pool (t · hm ⁻²)	氮库 Nitrogen pool (t · hm ⁻²)	磷库 Phosphorous pool (t · hm ⁻²)
北长山岛 Beichangshan Island	刺槐群落 <i>Robinia pseudoacacia</i> community	23.02	0.83	1.62
	麻栎群落 <i>Quercus acutissima</i> community	24.05	0.45	1.20
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	43.34	1.13	1.49
	荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> shrubs	51.49	1.92	2.41
南长山岛 Nanchangshan Island	刺槐群落 <i>Robinia pseudoacacia</i> community	93.33	2.16	2.85
	麻栎群落 <i>Quercus acutissima</i> community	23.52	0.70	1.33
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	59.91	0.75	1.11
	荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> shrubs	32.64	2.12	0.93
庙岛 Miao Island	刺槐群落 <i>Robinia pseudoacacia</i> community	83.66	1.89	2.15
	麻栎群落 <i>Quercus acutissima</i> community	32.98	0.86	1.16
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	60.38	0.95	3.10
	荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> shrubs	47.74	0.90	1.51
秦山岛 Qinshan Island	刺槐群落 <i>Robinia pseudoacacia</i> community	98.85	2.73	3.33
	丝棉木群落 <i>Euonymus maackii</i> community	123.69	3.96	11.87
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	189.20	7.19	0.37
	扁担木灌丛 <i>Grewia biloba</i> shrubs	157.76	21.35	10.87
泗礁岛 Sijiao Island	麻栎群落 <i>Quercus acutissima</i> community	20.03	0.77	0.36
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	25.19	0.18	0.24
外马廊岛 Waimalang Island	野桐灌丛 <i>Mallotus japonicus</i> shrubs	17.94	0.32	0.19
梅山岛 Meishan Island	舟山新木姜子群落 <i>Neolitsea sericea</i> community	83.74	5.90	0.69
鹤浦岛 Hepu Island	石砾灌丛 <i>Lithocarpus glaber</i> shrubs	74.94	5.72	0.52
大金山岛 Dajinshan Island	青冈群落 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> community	94.58	5.91	2.75
	丝棉木群落 <i>Euonymus maackii</i> community	119.34	6.47	1.09
	天竺桂灌丛 <i>Cinnamomum japonicum</i> shrubs	110.50	4.80	3.43
普陀山岛 Putuo Island	青冈群落 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> community	59.59	1.41	1.47
	枫香群落 <i>Liquidambar formosana</i> community	62.46	2.23	2.43
	台湾蚊母树群落 <i>Distylium gracile</i> community	95.18	1.94	2.37
	马尾松群落 <i>Pinus massoniana</i> community	61.49	2.62	3.40
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	106.71	1.21	0.86
	罗汉松群落 <i>Podocarpus macrophyllus</i> community	73.25	1.56	1.80
	红山茶灌丛 <i>Camellia azalea</i> shrubs	52.70	1.88	2.05
	榧木灌丛 <i>Loropetalum chinense</i> shrubs	78.84	2.88	5.68
洛伽山岛 Luojiashan Island	柘木灌丛 <i>Cudrania tricuspidata</i> shrubs	75.37	1.40	1.55
	红楠群落 <i>Machilus thunbergii</i> community	71.73	1.13	1.43
	滨柃灌丛 <i>Eurya emarginata</i> shrubs	63.06	4.04	2.76
朱家尖岛 Zhujiajian Island	青冈群落 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> community	66.81	3.27	2.54
	红楠群落 <i>Machilus thunbergii</i> community	51.88	0.97	0.93
烽火岛 Fenghuo Island	台湾相思树群落 <i>Acacia confusa</i> community	63.71	2.92	1.22
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	54.69	5.83	1.68
	化香群落 <i>Platycarya strobilacea</i> community	36.73	1.71	0.39
大屿岛 Dayu Island	台湾相思树群落 <i>Acacia confusa</i> community	59.62	3.73	0.91
	黑松群落 <i>Pinus thunbergii</i> community	64.61	3.87	1.39
	黑松灌丛 <i>Pinus thunbergii</i> shrubs	45.90	0.66	0.79

碳氮磷库具有显著影响 ($F = 7.15, P < 0.001$)。土壤碳库最高的为秦山岛的黑松 (*Pinus thunbergii*) 群落, 最低的为外马廊岛的野桐 (*Mallotus japonicus*) 灌丛。土壤氮库最高的为秦山岛的扁担木 (*Grewia biloba*) 灌丛, 最低的为泗礁岛的黑松群落。土壤磷库最高的为秦山岛的丝棉木 (*Euonymus maackii*) 群落, 最低的为外马廊岛的野桐 (*Mallotus japonicus*) 群落。

如图 2 所示, 海岛森林土壤碳氮磷库随纬度变化差异显著, 整体上亚热带高于暖温带。其中, 各温度带森林土壤碳库的大小为: 北亚热带 > 中亚热带 > 南亚热带 > 暖温带; 氮库的大小为: 北亚热带 > 南亚热带 > 中亚热带 > 暖温带; 磷库的空间分布格局为:

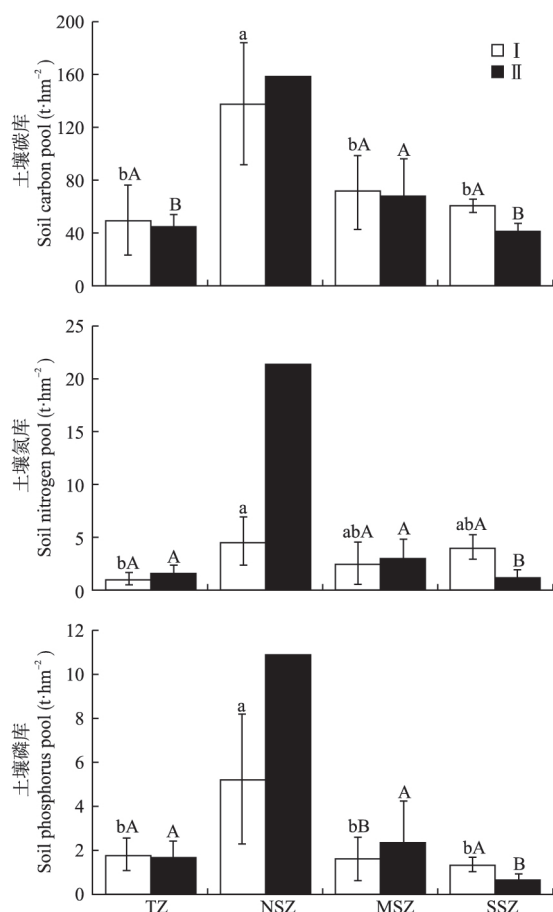


图 2 不同温度带海岛森林和灌丛土壤碳、氮、磷库

Fig.2 Soil carbon, nitrogen and phosphorus pools in island forests and shrubs across four climatic zones.

TZ: 暖温带 Temperate zone; NSZ: 北亚热带 Northern subtropical zone; MSZ: 中亚热带 Mid-subtropical zone; SSZ: 南亚热带 Southern subtropical zone. 不同小写字母表示不同温度带间森林差异显著, 不同大写字母表示同一温度带森林与灌丛间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters indicated significant difference among climatic zones in forest, and different capital letters indicated significant difference between forest and shrub in the same climatic zone at 0.05 level. 北亚热带灌丛只有一个群落, 故没有进行差异性检验 There was only one plot in the north subtropical zone, thus, the statistical test was dismissed. 下同 The same below. I: 森林 Forest; II: 灌木 Shrub.

北亚热带 > 暖温带 > 中亚热带 > 南亚热带。各温度带灌丛土壤碳氮库的排序与森林一致, 灌丛土壤磷库则与森林不同, 表现为中亚热带高于暖温带, 其大小为: 北亚热带 > 中亚热带 > 暖温带 > 南亚热带。

各温度带内, 森林和灌丛土壤的差异性规律不一致, 如暖温带与中亚热带的土壤碳、氮库在森林和灌丛间没有显著差异; 北亚热带灌丛碳、氮、磷库高于森林, 而南亚热带与之相反, 森林显著高于灌丛。

2.2 海岛不同植被类型土壤碳、氮、磷库

如图 3 所示, 针叶林土壤碳氮库在北亚热带高于其他温度带, 磷库变化趋势不明显。落叶林土壤碳、氮库在北亚热带与中亚热带间没有显著差异。整体上, 亚热带高于暖温带。常绿阔叶林土壤碳、氮库在中亚热带与南亚热带间无显著性差异, 而磷库在中亚热带大于南亚热带。

不同温度带各植被类型土壤碳和氮磷养分库的变化不同。暖温带土壤碳库为针叶林 > 落叶林, 氮库变化相反, 磷库无显著变化。北亚热带土壤碳和氮库

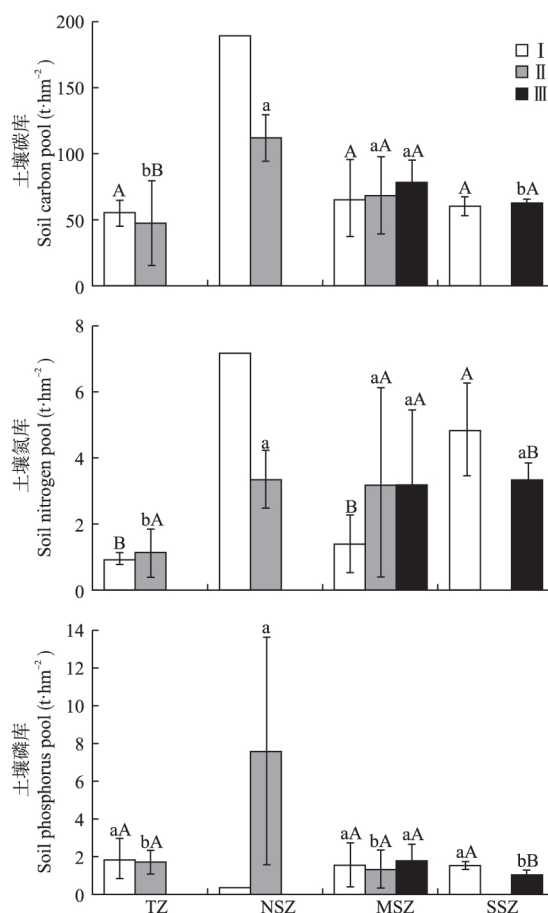


图 3 不同植被类型土壤碳氮磷库

Fig.3 Soil C, N, P pools in different vegetation types.

I: 针叶林 Coniferous forest; II: 落叶林 Deciduous forest; III: 常绿阔叶林 Evergreen forest.

均为针叶林>落叶林,磷库变化相反.中亚热带土壤碳库和磷库在3种植被类型间无显著差异,氮库则是常绿阔叶林和落叶林显著大于针叶林.南亚热带土壤氮库和磷库为:针叶林>常绿阔叶林,碳库无显著差异.

2.3 土壤碳氮磷库与生物和非生物因子的关系

由表3可以看出,14个海岛不同植被土壤碳库变化不取决于单一的非生物因子或生物因子,而是受不同因素的交互影响,主要有年均温和年降水量的2因子交互、年均温-年降水量-土壤含水量的3因子交互以及年均温-年降水量-物种多样性的3因子交互作用.

土壤氮库变化与群落物种多样性变化密切相关.另外,与土壤碳库的影响因素相似,年均温和年降水量的交互影响、年均温-年降水量-土壤含水量的交互影响,以及年均温-年降水量-土壤含水量-物种多样性4因子的交互作用也非常显著.其中,4因子综合作用中,年降水量的影响高于年均温.

土壤磷库变化的影响因素相对复杂,不仅受土壤含水量与物种多样性单因子的影响,也受年均温、

年降水量、土壤含水量、物种多样性这些因子间交互作用的影响.

3 讨 论

3.1 水热和生物因子对海岛土壤碳氮磷库的影响

土壤碳和氮磷养分库大小与植物群落类型和环境要素密切相关^[13-14].本研究发现,我国东部14个不同温度带海岛水热因子的变化及其相关联的植被类型差异对土壤碳氮磷库有显著影响.在诸多生物和非生物因素中,年均温、年降水量、土壤湿度和物种多样性是其主要驱动因子,这些因素通过交互作用影响森林植被土壤碳和氮磷养分库.

在纬度梯度上,亚热带海岛森林和灌丛土壤的碳和氮库高于暖温带.这一格局与 Attiwill 等^[2]对凋落物养分归还的研究结果一致,即生物群区和森林类型是决定凋落物产量和养分归还量的决定因素,热带、亚热带森林凋落物养分归还显著高于温带和寒温带森林.本研究中,亚热带区域森林和灌丛土壤碳、氮库随纬度升高而增加,这与我国大陆森林土壤碳密度的纬度变化趋势一致^[2].海岛森林和灌丛土壤磷库随纬度下降而减小,在南亚热带最低,这与土壤磷随着降雨量增加而减少的规律一致^[14].在同一温度带,由于水热和生物因素差异小,土壤碳氮磷库有可能变化不大.例如,暖温带的北长山岛、南长山岛、庙岛,以及南亚热带的大屿岛、烽火岛之间,再如鹤浦岛、洛迦山岛、梅山岛、朱家尖4个岛屿水热条件相似,其植被均为常绿阔叶林,土壤碳库差异较小.

土壤碳与养分库大小是植物与土壤长期相互作用的结果,土壤养分库在很大程度上制约植物生长,同时植物对土壤养分库产生影响.本研究中,土壤碳氮磷库最高的为秦山岛,最低为外马廊岛.主要原因是外马廊岛土层稀薄,养分贫乏,植被稀疏,以野桐(*Mallotus japonicus*)和茅草(*Imperata cylindrica*)为主,植物对土壤的改造能力薄弱,土壤养分流失严重.相反,秦山岛土壤和植被发育良好,土层厚,丝棉木群落为海岛地带性森林,植被与土壤间具有良性反馈机制,有利于土壤碳与养分库积累.可见,海岛植被类型的差异是决定土壤碳氮磷库变化的重要方面.落叶林主要分布在暖温带、北亚热带及中亚热带,土壤养分库整体表现为亚热带高于暖温带,这与亚热带优越的水热环境条件有关.落叶林叶片养分含量高,在亚热带更易分解回归土壤.常绿阔叶林分布在中亚热带与南亚热带,土壤碳、氮库的差异较

表3 基于广义线性模型的海岛森林和灌丛土壤碳氮磷库的影响因素分析结果

Table 3 Results of the generalized linear models with respect to the effect factors on soil C, N and P pools in forest and shrub across islands

响应变量 Response variable	解释变量 Explanatory variable	参数估计值 Estimate	t	P
土壤碳库 Soil carbon pool	MAT×MAP	3.25	4.565	<0.05
	MAT×MAP×SMC	2.32	8.670	<0.001
	MAT×MAP×SD	7.34	5.233	<0.001
	MAT×MAP×SMC×SD	4.16	3.401	<0.001
土壤氮库 Soil nitrogen pool	SD	7.57	2.986	<0.05
	MAT×MAP	0.025	3.879	<0.05
	MAT×MAP×SMC	-0.06	-3.231	<0.05
	MAT×MAP×SD	0.02	4.898	<0.001
	MAP×SMC×SD	0.77	1.497	<0.05
土壤磷库 Soil phosphorous pool	MAT×MAP×SMC×SD	9.92	4.443	<0.001
	SMC	-0.49	-1.536	<0.05
	SD	-17.20	-2.582	<0.05
	MAT×MAP	15.91	2.987	<0.05
	MAT×SMC	0.59	2.310	<0.05
	MAP×SMC	0.23	2.918	<0.05
	MAT×MAP×SMC	-0.02	-1.522	<0.05
	MAT×MAP×SD	-0.51	-4.319	<0.001
	MAP×SMC×SD	-0.37	-2.844	<0.05
	MAT×MAP×SMC×SD	6.97	3.822	<0.001

MAT: 年均温 Mean annual temperature; MAP: 年降水量 Mean annual precipitation; SMC: 土壤含水量 Soil water content; SD: 物种多样性 Species diversity.

小,而磷库则为中亚热带高于南亚热带,其原因是南亚热带土壤更容易被淋溶侵蚀,磷损失量较高^[23]。

3.2 植被组成对海岛土壤碳、氮、磷库的影响

在相同温度带内的海岛,也因植被组成树种的不同,土壤碳和氮磷养分库发生变化^[24]。例如,暖温带的北长山岛、南长山岛、庙岛及北亚热带的秦山岛,黑松林土壤碳库显著高于刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、麻栎(*Quercus acutissima*)等落叶林;相反,氮磷库的整体趋势为落叶林高于针叶林。这种差异与针叶树种和落叶树种功能策略的差异有关,针叶植物功能策略偏保守,其养分循环以内循环为主,凋落物难分解,养分释放慢,因而有利于提高土壤碳含量,但减少了土壤氮磷养分含量^[25-26]。相反,落叶树种叶片养分含量高,以养分外循环为主,且极易分解和周转,从而有利于土壤氮磷养分积累,但不利于碳积累^[9]。另外,土壤碳和氮磷养分库大小也与森林演替状态有关^[23]。例如,大金山岛经过近 30 年的封岛育林,植被总体发育良好,土层厚,土壤碳库及养分库在 14 个岛屿中仅次于秦山岛。在岛内,青冈林演替年龄大于丝绵木(*Euonymus maackii*)林,其土壤碳与氮磷养分库含量也较高。土壤碳库、氮库的空间变异还与物种多样性随纬度降低而升高的格局有关。例如,相比于暖温带,南亚热带与中亚热带常绿阔叶林具有巨大的土壤养分库和碳库含量,这是因为伴随着植物物种多样性的增加,植物间的养分利用策略及养分周转速率差异性增加,在植物群落内部实现资源互补,资源利用的优化使得整体上植物返还土壤养分的来源增多,养分质量随之提升,从而改变土壤碳库的积累过程及氮素的循环途径。土壤磷库与物种多样性之间呈负相关,这与热带地区温暖湿热,土壤磷缺乏,但植物物种多样性高,对磷素的竞争吸收更为强烈有关。

3.3 海岛土壤碳、氮、磷库的特殊性

由于海岛的隔离属性,其土壤碳氮磷库特征也有其特殊性。最为显著的特征是,暖温带和亚热带海岛土壤碳库和磷库均高于内陆森林土壤,而土壤氮库相反,显著低于我国内陆土壤^[27-30]。另外,海岛土壤碳库含量随纬度上升而下降,这与我国大陆森林土壤碳密度随纬度升高而增加的趋势相反^[22,31]。究其原因,可能是海岛生态系统的特殊环境,使得在高纬度地区的针叶树种及落叶阔叶树种为适应贫瘠生境,采用保守型生活策略,具有较高的养分重吸收效率,导致凋落叶层养分较低,进而影响土壤碳回归与积累。与之相反,大陆地区生境辽阔,土壤厚度高于

海岛,有利于土壤碳积累。

总之,本研究所揭示的海岛森林土壤碳库和氮磷养分库变化特征,及其生物和非生物驱动成因,为深入理解海岛生态系统的物质循环特征提供了研究基础。但是,本研究所涉及的海岛类型较少,纬度梯度的覆盖不够全面,需要进一步研究。

参考文献

- [1] Porazinska DL, Bardgett RD, Blaauw MB. Relationships at the aboveground-belowground interface: Plant, soil biota, and soil process. *Ecological Monographs*, 2003, 73: 377-395
- [2] Willis KJ, Braun M, Simegi P, et al. Does soil change cause vegetation change or vice versa? A temporal perspective from hungry. *Ecology*, 1997, 78: 740-750
- [3] Waston RT, Zinyowera MC, Moss RH. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996
- [4] Zhou X-Y (周晓宇), Zhang C-Y (张称意), Guo G-F (郭广芬). Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, 21(7): 1867-1874 (in Chinese)
- [5] Aerts R, Chapin FS III. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1-67
- [6] Li H-B (李鸿博), Shi K (史 钊), Xu D-Y (徐德应). Effects of plant process on soil organic carbon concentration. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2005, 16(6): 1163-1168 (in Chinese)
- [7] Fitter AH. Darkness visible: Reflections on underground ecology. *Journal of Ecology*, 2010, 93: 231-243
- [8] Chapman SK, Langley JA, Hart SC, et al. Plants actively control nitrogen cycling: Uncorking the microbial bottleneck. *New Phytologist*, 2006, 169: 27-34
- [9] Knops JMH, Bradley KL, Wedin DA. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling. *Ecology Letters*, 2010, 5: 454-466
- [10] Templer PH, Lovett GM, Weathers KC, et al. Influence of tree species on forest nitrogen retention in the Catskill Mountains, New York, USA. *Ecosystems*, 2005, 8: 1-16
- [11] Reich PB, Ellsworth DS, Walters MB, et al. Generality of leaf trait relationships: A test across six biomes. *Ecology*, 1999, 80: 1955-1969
- [12] Wright IJ, Westoby M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: Leaf traits of Australian sclerophyll species. *Functional Ecology*, 2003, 17: 10-19
- [13] Bonanomi G, Setälä H. Negative plant-soil feedback and species coexistence. *Oikos*, 2010, 111: 311-321
- [14] Breemen NV, Finzi AC, Canham CD. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: Effects of soil ele-

- mental composition and texture on species distributions. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, **27**: 1110–1116
- [15] Aerts R. Nutrient use efficiency in evergreen and deciduous species from heathlands. *Oecologia*, 1990, **84**: 391–397
- [16] Harrington RA, Fownes JH, Vitousek PM. Production and resource use efficiencies in N- and P-limited tropical forests: A comparison of responses to long-term fertilization. *Ecosystems*, 2001, **4**: 646–657
- [17] Su B (苏波), Han X-G (韩兴国), Huang J-H (黄建辉), et al. The nutrient use efficiency (NUE) of plants and its implications on the strategy of plant adaptation to nutrient stressed environments. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(2): 335–343 (in Chinese)
- [18] Wang X-K (王效科), Feng Z-W (冯宗炜), Ouyang Z-Y (欧阳志云). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(1): 13–16 (in Chinese)
- [19] Wang T (汪涛), Yang Y-H (杨元合), Ma W-H (马文红). Storage, patterns and environmental controls of soil phosphorus in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报: 自然科学版), 2008, **44**(6): 945–952 (in Chinese)
- [20] Wang X-L (王晓丽), Wang Y (王媛), Shi H-H (石洪华), et al. Discussion of carbon sequestration estimates in the island terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(1): 88–96 (in Chinese)
- [21] Attiwill PM, Adams MA. Nutrient cycling in forests. *New Phytologist*, 1993, **124**: 561–582
- [22] Zhou Y-R (周玉荣), Yu Z-L (于振良), Zhao S-D (赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2000, **24**(5): 518–522 (in Chinese)
- [23] Yan E-R (阎恩荣), Wang X-H (王希华), Chen X-Y (陈小勇). Impacts of evergreen broad-leaved forest, degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(4): 1646–1655 (in Chinese)
- [24] Jiang H (江洪), Yu S-Q (余树全), Ma Y-D (马元丹), et al. Litter decomposition of dominant plant species in successional stages in mid-subtropical zone. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(3): 537–542 (in Chinese)
- [25] Li J-T (黎锦涛), Sun X-K (孙学凯), Hu Y-L (胡亚林), et al. Effects of drying-rewetting on leaf litter decomposition and nutrient releases in forest plantations in Horqin Sandy Land, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(6): 1743–1752 (in Chinese)
- [26] Wang X-H (王希华), Huang J-J (黄建军), Yan E-R (阎恩荣). Leaf nutrient use efficiency of some trees in Tiantong National Forest Park. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2004, **23**(4): 13–16 (in Chinese)
- [27] Tian HQ, Chen GS, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, **98**: 139–151
- [28] Yang YH, Ma WH, Mohammad A, et al. Storage, patterns and controls of soil nitrogen in China. *Pedosphere*, 2007, **17**: 776–785
- [29] Zhang C, Tian HQ, Liu JY, et al. Pools and distribution of soil phosphorus in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**: GB1020
- [30] Tian HQ, Wang SQ, Liu JY, et al. Patterns of soil nitrogen storage in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, **20**: GB1001
- [31] Wang S-Q (王绍强), Zhou H-C (周虎成), Li K-R (李克让), et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2000, **55**(5): 533–544 (in Chinese)

作者简介 妥彬,男,1993年生,硕士研究生.主要从事植物功能性状研究. E-mail: tbladestar.90s@gmail.com

责任编辑 孙菊

妥彬,田文斌,郭超,等.中国东部海岛森林和灌丛土壤碳氮磷养分库的纬度变化.应用生态学报,2019,30(8):2631–2638
Tuo B, Tian W-B, Guo C, et al. Latitudinal variation in soil carbon, nitrogen and phosphorus pools across island forests and shrublands in eastern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(8): 2631–2638 (in Chinese)