

中国土壤有机碳分解特征研究初报^①

潘剑君, 郝珖存, 孟静娟

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 通过土壤样品的室内培养, 运用三库一级动力学理论, 对我国典型区域土壤有机碳分解特征进行了研究, 结果表明: 土壤有机碳分解均呈现前期分解快速和后期分解缓慢的特点, 土壤有机碳分解的平衡点大概为 2 个月, 之后的日均分解量变化非常小。我国东部 4 种地带性土壤有机碳分解速率随纬度的增加而递增。不同种植方式农田土壤有机碳分解速率: 菜园 > 水田 > 旱地 > 果园。6 个地区表层土壤有机碳含量范围为 2.31 ~ 81.93 g/kg; 活性碳含量范围为 0.09 ~ 1.04 g/kg; 缓效性碳含量范围为 0.90 ~ 33.39 g/kg; 惰效性碳含量范围 0.92 ~ 47.85 g/kg。

关键词: 中国; 土壤有机碳; 分解特征;

中图分类号: S153.621

近几十年来, 大气 CO₂ 浓度的增加引起的全球变化是目前人们共同关注的一个全球话题^[1]。据 IPCC 预测, 到 2040 年, CO₂ 浓度将从现在的 354 mg/L 升至 500 mg/L^[2]。由于土壤中所储存的碳大约是植被的 1.5 ~ 3 倍, 而且是全球生物地球化学循环中极其重要的生态因子^[3]。土壤有机碳通过呼吸释放 CO₂ 是决定陆地生态系统碳平衡的主要因子, 是土壤与大气快速交换 CO₂ 的主要形式。土壤有机碳库储量较小幅度的变动, 皆可能影响大气中 CO₂ 水平。土壤有机碳的累积和释放 (主要通过矿化作用实现) 是一个动态平衡过程。当有机碳形成量大于矿化量时, 土壤作为碳汇起固碳作用; 反之土壤作为碳源向大气中释放碳 (主要以 CO₂ 形式)。对土壤有机碳分解速率的研究不仅可以帮助有效地分析土壤碳释放情况, 为估算土壤固碳能力、估算土壤碳储量提供科学可信的基础数据, 而且可以对土壤碳循环与全球气候变化之间的相互作用研究提供依据。本文通过对中国 6 个实验点的森林、农田生态系统土壤有机碳分解进行研究试验, 得到了一些结果和初步结论。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域包括中国湿润温带地区的吉林长白山、干旱暖温带地区的甘肃祁连山、干旱沙漠地区的内蒙

额济纳旗、湿润北亚热带的江苏南京、湿润中亚热带的江西余江和湿润南亚热带的贵州黎平。

1.2 实验方法

1.2.1 土壤样品采集与处理 土壤样品分别采自长白山、祁连山、额济纳旗、南京、余江和黎平这 6 个地区, 采集时, 按照土壤发生层自下而上采集 2 个或 3 个土层, 同一层次不同处理的土样充分混合后, 取大约 1 kg 左右混合样带回实验室充分风干, 剔除非土壤组成成分, 然后分别过 2 mm 筛和 0.149 mm 筛, 留作培养和化学分析之用。采集土壤的土壤类型、植被覆盖类型等分别见表 1~6。

1.2.2 测定方法 土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化-外加热法; 土壤全氮测定采用半微量开氏法 (K₂SO₄-CuSO₄-Se); 土壤 pH 测定采用电位法^[4]。

土壤惰性碳测定采用酸水解法^[5]。具体步骤为: 称取 2 g 过 2 mm 筛的风干土放于消煮管中, 然后加入 6 mol/L 盐酸 20 ml, 用可调温度的消煮板在 115℃ 消煮 16 h, 消煮过程不断摇晃试管洗掉试管壁上积聚物质, 样品冷却后用蒸馏水洗至中性, 然后在 55℃ 下烘干, 研磨过 165 μm 筛, 用重铬酸钾容量法-外加热法测得的有机碳即为惰性碳。

土壤有机碳分解动态测定采用室内恒温培养、碱液吸收法^[5]。具体步骤为: 称取过 0.9 mm 筛风干土样 100 g 于呼吸瓶底部, 调节含水量为田间持水量 65%

①基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (30590381) 和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目 (0812000026) 资助。

作者简介: 潘剑君 (1959—), 男, 江苏人, 博士, 教授, 主要从事农业资源遥感与信息技术研究。E-mail: jpan@njau.edu.cn

表 1 长白山地区土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of forest soils in Changbai Mountain

样点	土层深度 (cm)	土壤类型	植被覆盖类型	海拔 (m)	总碳 (g/kg)	pH	体积质量 (g/cm ³)	<0.002 mm 黏粒 (g/kg)
1	0~8	棕色针叶林土	云冷杉、落叶松林	1 592	61.15	4.75	0.53	15.90
	8~45				7.79	5.62	1.08	14.70
2	0~14	暗棕壤	杜香落叶松	1 398	54.75	5.07	0.74	6.63
	14~47				5.40	5.79	1.24	1.45
3	0~12	棕色针叶林土	红杉、云冷杉林	1 300	74.41	5.07	0.62	8.69
	12~30				14.08	5.57	0.93	5.25
4	0~9	暗棕壤	针阔混交林	965	103.37	5.38	0.46	11.50
	9~25				11.90	6.11	0.93	7.86
5	0~11	暗棕壤	美人松林	706	87.67	5.80	1.1	6.82
	11~20				20.20	5.97	1.4	2.71

表 2 南京地区土壤的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soils in Nanjing area

样点	深度 (cm)	土壤类型	植被类型	总碳 (g/kg)	pH	体积质量 (g/cm ³)	全氮 (g/kg)
1	0~19	黄棕壤	针阔混交林	22.25	7.23	1.52	1.83
	19~57			7.74	6.18	1.35	0.50
2	0~25	黄棕壤	灌木林	12.15	6.57	1.48	1.21
	25~60			6.70	6.52	1.69	0.64
3	0~21	沼泽土	芦苇	42.29	-	0.92	2.51
	21~61			1.10	-	1.10	2.11
4	0~19	普通黄棕壤	针阔混交林	1.36	-	1.36	0.89
	19~64			1.41	-	1.41	0.60
5	0~18	棕色石灰土	乔木、灌木	1.13	-	1.13	1.40
	18~66			1.18	-	1.18	1.11
6	0~33	菜园土	蔬菜	15.48	7.56	1.33	0.99
	33~50			3.50	7.45	1.67	0.29
7	0~16	潞育型水稻土	水稻	9.74	6.63	1.4	0.86
	16~38			3.06	7.14	1.48	0.28

表 3 黎平地区土壤的理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of soils in Liping area

样点	土层深度 (cm)	土壤类型	植被类型	总碳 (g/kg)	pH	体积质量 (g/cm ³)	<0.002mm 黏粒 (g/kg)	全氮 (g/kg)
1	0~45	黄壤	杉木(12年)	37.47	4.96	0.56	17.70	2.023
	45~65			16.65	5.06	0.72	18.10	1.17
2	0~20	黄壤	杉木(40年)	21.17	4.84	0.46	17.90	1.45
	20~60			6.09	4.72	0.71	22.10	0.63
3	0~25	黄壤	杉木(8年)	17.45	6.40	0.53	26.10	1.39
	25~80			5.24	4.36	0.86	35.20	0.634
4	0~30	红壤	常绿阔叶林	23.596	4.89	0.75	21.7	0.461
	30~60			4.635	4.59	0.83	19.2	1.74
5	0~15	黄壤	常绿阔叶林	24.73	4.42	0.645	22.9	2.096
	15~80			6.694	4.72	0.73	22.2	0.694

表4 余江地区土壤的理化性质

Table 4 Physical and chemical properties of soils in Yujiang area

样点	土层深度 (cm)	土壤类型	植被类型	海拔 (m)	总碳 (g/kg)	pH	<0.002mm 黏粒 (g/kg)	全氮 (g/kg)
1	0~18	红壤	杉木(32年)	192	26.59	4.33	35.6	1.97
	18~60				12.09	4.5	41.2	1.12
2	0~18	红壤	杉木(16年)	190	25.34	4.53	29.2	1.95
	18~60				7.43	4.55	34.8	0.69
3	0~22	红壤	杉木(5年)	163	30.57	4.12	29.8	2.4
	22~60				10.77	4.4	36.7	1.13
4	0~18	潜育黄泥土	水稻	-	22.36	5.13	22.6	2.23
	18~28				4.59	5.48	19.3	0.05
5	0~15	潜育黄泥土	水稻	-	14.6	4.8	28.6	1.40
	15~24				4.66	5.3	22.8	0.57
6	0~15	潜育黄泥土	水稻	-	25.72	5.12	26.2	2.55
	15~24				7.19	5.29	20.3	0.81
7	0~15	红黏土红壤	桔树	56	6.31	4.89	-	0.74
	15~60				3.09	4.60	-	0.70
8	0~10	红黏土红壤	花生	50	12.36	4.73	-	1.18
	10~60				5.60	4.65	-	0.62

表5 祁连山地区土壤的理化性质

Table 5 Physical and chemical properties of soils in Qilian Mountain

样点	深度 (cm)	土壤类型	植被类型	海拔 (m)	总碳 g/kg	pH	<0.002 mm 黏粒 (g/kg)
1	0~15	灰褐土	原始云杉木	2883	87.13	8.06	13.80
2	0~10	栗钙土	山地草原	2875	56.87	8.14	13.50

表6 额济纳旗地区土壤的理化性质

Table 6 Physical and chemical properties of soils in Ejina County

样点	深度 (cm)	土壤类型	植被类型	总碳 (g/kg)	pH	<0.002 mm 黏粒 (g/kg)
1	0~30	砂土	红柳	2.03	8.24	3.21
2	0~35	砂土	老年胡杨林	4.71	8.66	3.67
3	0~30	砂土	中年胡杨林	1.54	9.37	3.48
4	0~30	砂土	千年胡杨林	2.01	8.72	3.36
	30~60			2.55	8.82	3.32

时的需水量，在吸收瓶中加入 20 ml 0.5 mol/L NaOH（保证在要求时间内能吸收完释放的 CO₂，并有少量盈余），同时进行空白试验。然后放置在 25℃ 的恒温培养箱内，黑暗条件下培养 3 个月，在一定时间间隔之后，将吸收液全部抽出并换上新的吸收瓶，再按上述方法继续培养；抽出的吸收液加 20 ml 的 1 mol/L BaCl₂，摇匀后以酚酞为指示剂，用 0.4 mol/L HCl 滴定

中和未耗尽的 NaOH，通过 HCl 消耗量来计算 CO₂ 的数量，进而求出有机碳的分解量。

1.2.3 土壤有机碳库模型拟合法 土壤有机质是由各种有机物质组成的复杂系统，用单一组分或一库来描述整个土壤的分解速率和周转周期是不合理的，通常根据有机碳的周转时间不同，将土壤有机碳库划分为活性碳库 (C_a)、缓效性碳库 (C_s) 和惰性碳库 (C_t)

[6]。本研究结合土壤呼吸培养数据和常规测定数据,运用三库一级动力学方程对土壤活性碳库和缓效性碳库大小及周转时间进行拟合。拟合方程为:

$$C_{\text{soc}t} = C_a \times \exp(-k_a \times t) + C_s \times \exp(-k_s \times t) + C_r \times \exp(-k_r \times t) \quad (1)$$

式中, $C_{\text{soc}t}$ 是时间 t 时刻的有机碳含量; C_a 、 C_s 、 C_r 分别是土壤活性碳库、缓效性碳库及惰性碳库的含量 (g/kg); K_a 、 K_s 、 K_r 分别表示三库的分解速率 (d^{-1}), 其大小与平均驻留时间 (MRT) 成倒数关系[6]。由于实验室培养温度与田间实际温度之间存在差异, 必然影响各碳库周转时间, 因此需对其进行转换[7]:

$$MRT_{\text{lab}} = MRT_{\text{field}}/Q_{10} \quad (2)$$

$$Q_{10} = 2^{[(25 - MAT)/10]} \quad (3)$$

式中, MAT 为研究区年平均温度。该模型中已知变量为 $C_{\text{soc}t}$ 和 t , 未知参数为 C_a 、 K_a 、 K_s (C_s 可用方程 $C_s = C_{\text{soc}} - C_r - C_a$ 代替以减少参数), 由于土壤惰性碳平均驻留时间太长, 不容易获得, 一般假设田间土壤惰性碳的平均驻留时间为 1000 年 (基本不影响模型)[8]。

长白山的 MAT 为 5°C , MRT_{lab} 为 250 年, K_r 为 $1.10\text{E}-5$; 额济纳旗的 MAT 为 8.3°C , MRT_{lab} 为 314 年, K_r 为 $8.72\text{E}-6$; 祁连山的 MAT 随海拔高度的不同而不同, 山地森林草原植被带和亚高山灌丛草甸植被带的 MAT 为: 0.7°C 、 -1.1°C , MRT_{lab} 分别为 186、164 年, K_r 分别为 $1.48\text{E}-5$ 、 $1.67\text{E}-5$; 南京的 MAT 为 16°C , MRT_{lab} 为 536 年, K_r 为 $5.11\text{E}-6$; 黎平的 MAT 为 15°C , MRT_{lab} 为 500 年, K_r 为 $5.48\text{E}-6$; 余江的 MAT 为 18.1°C , MRT_{lab} 为 620a, K_r 为 $4.40\text{E}-6$ 。

利用实验室土壤培养数据、实验测得的 C_{soc} 、 C_r 和假定的 MRT 推算出的 K_r , 根据一级动力学方程, 用 SAS9.0 中的非线性回归, 经过循环迭代, 迭代收敛, 残差平方和最小, 拟合出 C_a 、 K_a 和 K_s 3 个参数的估计值。最后用公式 (4) 计算出 C_s 的值。

$$C_s = C_{\text{soc}} - C_a - C_r \quad (4)$$

2 结果与讨论

土壤有机碳主要分布于上层 1 m 深度以内, 年龄随深度增加而增加, 说明深层土壤有机质较稳定[9]。因此对 6 个区域的表层土壤 (0 ~ 30 cm) 有机碳分解特征进行了分析。

2.1 森林土壤有机碳分解速率

森林土壤有机碳库是全球碳循环的重要组成部分, 其较小幅度的变化就可能影响到碳向大气排放, 以温室气体影响全球温度变化。因此揭示森林土壤有机碳动态变化对全球碳循环产生的影响有着十分重要的意义。

2.1.1 长白山森林土壤有机碳分解特征 长白山属于温带大陆性季风气候, 主要植被有蕨类植物、岳桦林、云冷杉落叶松、杜香落叶松、红山云冷杉、杨桦林等; 主要土壤类型棕色针叶林土、暗棕壤。棕色针叶林土和暗棕壤为我国东北地区的两种典型的地带性土壤类型, 两者具有共性, 即都具有针叶林森林植被, 形成枯枝落叶层, 发生酸性淋溶, 土壤呈酸性反应。从图 1 中可以看出, 长白山地区的棕色针叶林土分解速率大于暗棕壤, 这主要是因为棕色针叶林土的活性碳平均含量 (0.797 g/kg) 大于暗棕壤的活性碳平均含量 (0.749 g/kg)。对同种土壤类型、不同植被类型条件下土壤有机碳初始分解速率进行比较发现, 红山云冷杉棕色针叶林土 ($237.00 \text{ mg/(kg}\cdot\text{d)}$) 大于云冷杉林棕色针叶林土 ($201.00 \text{ mg/(kg}\cdot\text{d)}$), 针阔混交林暗棕壤 ($163.20 \text{ mg/(kg}\cdot\text{d)}$) 大于美人松暗棕壤 ($141.60 \text{ mg/(kg}\cdot\text{d)}$) 大于杜香落叶松暗棕壤 ($105.00 \text{ mg/(kg}\cdot\text{d)}$)。两种土壤的初始分解速率的高低均与土壤有机碳的含量呈正相关关系, 两种土壤有机碳的含量分别为红山云冷杉棕色针叶林土 74.41 g/kg 、云冷杉林棕色针叶林土 61.15 g/kg 、针阔混交林暗棕壤 103.37 g/kg 、美人松暗棕壤 87.67 g/kg 和杜香落叶松暗棕壤 54.76 g/kg [10]。另外, 影响土壤有机碳分解速率的还有植被凋落物的类型, 以暗棕壤为例, 针阔混交林的凋落物质地柔软, 糖类易分解成分含量较高, 而美人松和杜香落叶松的凋落物中难分解物质 (如单宁、木质素和纤维素等) 较多, 也致使分解速率相对小于针阔混交林土壤。

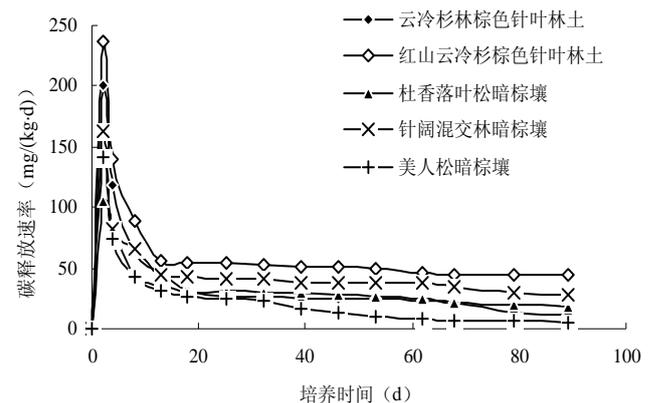


图 1 长白山地区棕色针叶林土、暗棕壤有机碳分解速率

Fig. 1 Decomposition rates of organic carbon of the brown coniferous soils and the dark-brown soils in Changbai Mountain area

2.1.2 南京有机碳分解特征 南京的地带性土壤类型是黄棕壤, 非地带性土壤类型有沼泽土、草甸土和棕色石灰土等。地带性自然植被类型为落叶阔叶与常绿阔叶的混交林。南京的 4 种土壤的有机碳分解速

率见图2。比较发现，4种类型土壤有机碳日平均分解速率顺序是沼泽土>草甸土>棕色石灰土>普通黄棕壤，土壤有机碳日平均最大分解量分别达到了157.1、40.99、17.82和15.38 mg/kg，分解速率在初期迅速达到最大，与培养初期调节土壤含水量出现的激发效应有关，土壤水分含量过低会限制微生物和根系呼吸，有资料显示，当土壤水分长期低于11%时，土壤呼吸会停止^[11]。水分胁迫的解除增大了土壤微生物的活性，从而加快了土壤有机碳的矿化速率，另外，干湿交替过程使土壤收缩和之后的膨胀破坏了土壤物理聚合，使微生物难以接近的一些有机质显露出来，同时之前土壤风干会引起大量微生物死亡，其死细胞也成为存活下来的微生物群落容易利用的物质，因此土壤呼吸骤然加强，有机碳分解速率迅速达到最大。之后迅速下降主要与易分解物质迅速被消耗有关。沼泽土分解速率明显大于其他3种土壤，主要是因为沼泽土（上层为泥炭层）的有机质含量非常高，一般土壤有机碳含量越高，其分解速率也越快^[12]。

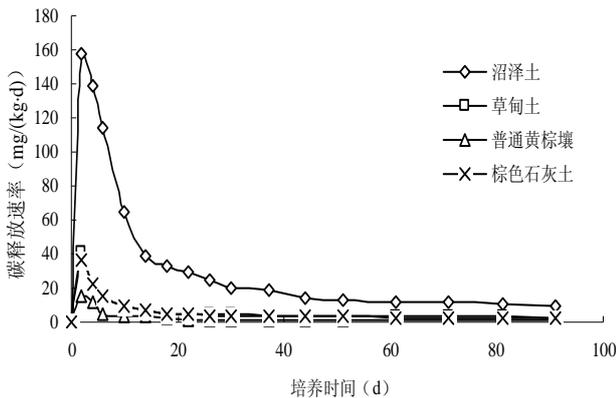


图2 南京地区4种土壤有机碳释放速率

Fig. 2 Decomposition rates of soil organic carbon in different soil types in Nanjing area

2.1.3 黎平土壤有机碳分解特征 黎平地帶性土壤类型为红壤和黄壤，植被类型有毛竹、杉木、马尾松、茅草、油茶、灌木林和常绿阔叶林等。分布在同一植被类型下不同土壤类型的有机碳分解速率变化曲线如图3。从图3中可以看出，二者初始分解速率大小顺序为：常绿阔叶林黄壤>常绿阔叶林红壤，和自身有机碳含量呈正相关关系（常绿阔叶林黄壤24.73 g/kg，常绿阔叶林红壤23.60 g/kg）；红壤比黄壤年平均气温高而且排水较好，酸度，黏粒含量均低于黄壤，分解速率却低于黄壤，其主要原因是在同一植被下，进入土壤中有机质含量的高低是影响有机碳分

解的主要因素。

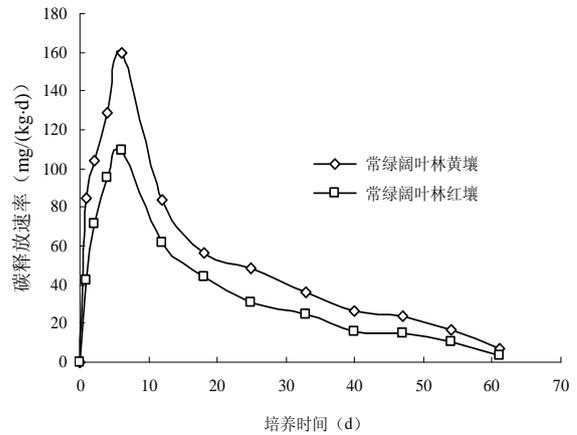


图3 黎平地区不同土壤类型有机碳分解速率

Fig. 3 Decomposition rates of soil organic carbon in different soil types in Liping area

2.1.4 祁连山有机碳分解特征 甘肃祁连山的山地广泛分布着灰褐土和栗钙土。选取同一海拔高度上的这两种土壤进行土壤有机碳分解的培养实验。图4是这两种土壤的有机碳平均分解速率。从图4可以看出，两种土壤分解速率是灰褐土>栗钙土。灰褐土为森林植被下形成的土壤，其植被覆盖程度高，每年可以向土壤提供丰富的植物残体，而栗钙土是干草原自然植被下发育而成的土壤，植物残体的输入量相对较少。从所测数据也可以看出灰褐土有机碳含量（85.57 g/kg）>栗钙土（62.34 g/kg），同样有机碳分解速率和自身有机碳含量呈正相关关系。

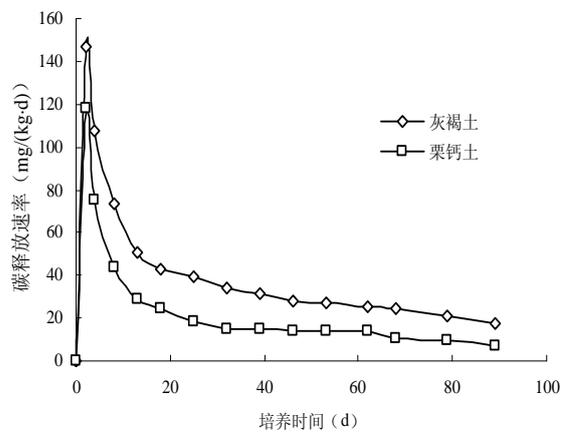


图4 祁连山地区不同土壤类型有机碳分解速率

Fig. 4 Decomposition rates of soil organic carbon in different soil types in Qilian Mountain area

2.1.5 额济纳旗有机碳分解特征 额济纳旗的风沙土是干旱温带地区的主要土壤类型，不同树龄胡杨林下土壤有机碳解速率见图 5。从图 5 可以看出，不同植被下有机碳分解速率，其顺序依次为：老年胡杨林 > 幼年胡杨林 > 红柳 > 千年胡杨林。不同植被下土壤有机碳含量分别为：老年胡杨林风沙土 4.71 g/kg，幼年胡杨林风沙土 1.26 g/kg，红柳风沙土 2.03 g/kg，千年胡杨林风沙土 2.01 g/kg。干旱地区水分条件差，风沙土贫瘠，有机质含量低，保水保肥能力差。土壤有机碳分解速率与凋落物组成和数量有关，老年胡杨林的凋落物数量要大于幼年胡杨林的，并且老年胡杨林的覆盖度大于幼年胡杨林，所以老年胡杨林的分解速率高^[13]。

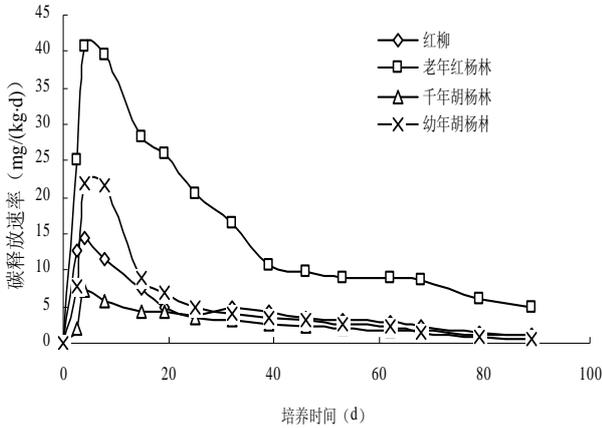


图 5 温带额济纳旗不同植被下风沙土有机碳释放速率
Fig. 5 Decomposition rates of soil organic carbon under different vegetations in aeolian sandy soil in Ejinaqi of temperate zone

2.1.6 余江有机碳分解特征 采样点选在江西省余江县高公寨林场，采集土壤均为红壤，植被类型为人工杉木林（杉木 5 年、杉木 16 年、杉木 32 年）。同一植被不同林龄下凋落物的结构组成差异不大，土壤有机碳分解速率的快慢主要由林下凋落物的数量及土壤中的 C/N 比决定。图 6 为不同林龄杉木有机碳分解速率，可以看出：土壤有机碳分解速率在培养前期差异很大，且分解速率随着林龄的增加而增加，即杉木（32）>杉木（16）>杉木（5 年）。杉木在生长的前 30 年凋落物的数量随着林龄的增加而增加，而土壤的呼吸速率与凋落物的物量呈正相关。不同林龄下土壤的 C/N 大小顺序为：杉木 32 年（13.51）>杉木 16 年（13.00）>杉木 5 年（12.74），在 C/N < 1.25

的情况下，氮素的含量相对富足，这是提高 C/N 比就会给微生物提供较多的能源，加快了微生物对有机碳的分解^[11]。

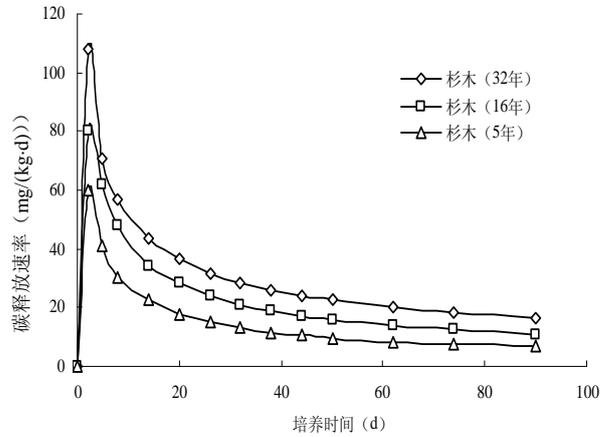


图 6 不同林龄杉木土壤有机碳分解速率

Fig. 6 Decomposition rates of soil organic carbon under different Chinese fir ages

2.1.7 我国东部地区森林土壤有机碳分解水平地带特征 红壤、黄棕壤、暗棕壤、棕色针叶林土是我国东部地区 4 种地带性土壤。图 7 为 4 种地带性土壤有机碳分解速率，可以看出分解速率大小为棕色针叶林土 > 暗棕壤 > 黄棕壤 > 红壤。分解规律与我国土壤水平带谱是一致的，即从南向北有机碳分解速率逐渐增加，由亚热带向寒温带，是逐渐升高的，土壤有机碳分解呈现随着纬度的增加而增加的趋势（图 8）。

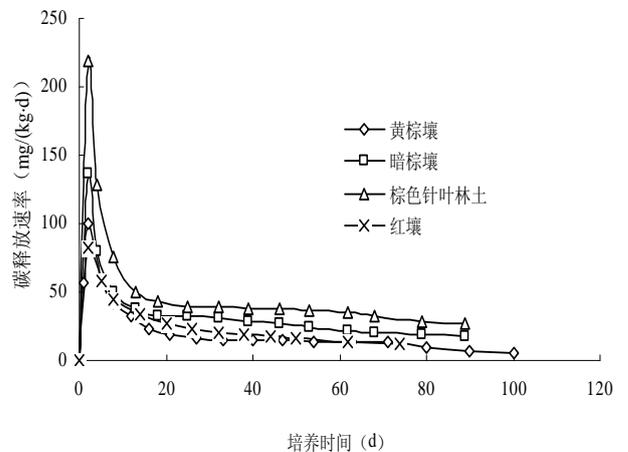
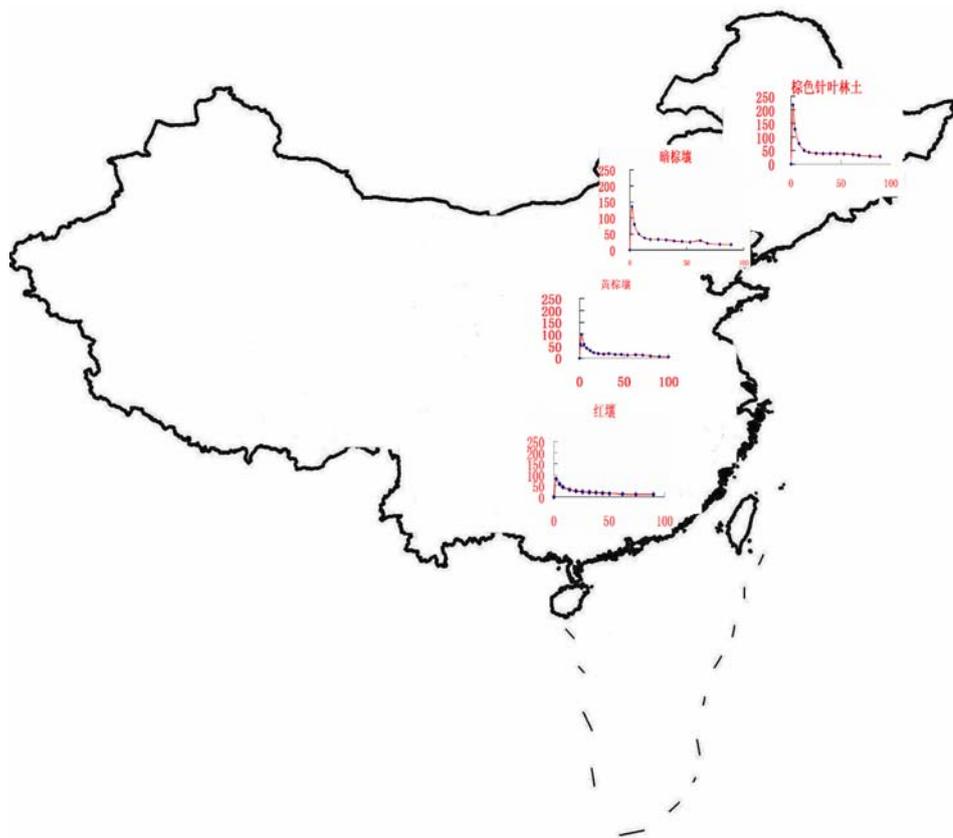


图 7 4 种地带性土壤有机碳释放速率

Fig. 7 Decomposition rates of four zonal soils organic carbon



(地图中折线图横坐标为培养时间 (d), 纵坐标为碳释放速率 (mg/(kg·d)))

图 8 4 种地带性土壤有机碳释放速率

Fig. 8 Decomposition rates of four zonal soils organic carbon

3 农田土壤有机碳分解特征

3.1 我国东部地区农田土壤有机碳的分解特征

农业生态系统中的碳库不仅是全球碳库的一个重要组成部分，而且是其中最活跃的部分^[13]。我国东部地区是我国重要的农业生产基地，研究其农田土壤的有机碳动态变化特征，揭示作物类型等对有机碳动态变化的影响，可为进一步研究农田土壤的碳源和碳汇效应，减缓土壤中温室气体排放，提高土壤质量，提供科学依据^[14]。

3.1.1 同种土壤不同作物有机碳分解速率比较

以江西省余江县的果园与旱地为研究对象，其土壤类型均为红壤，果园种植作物为柑桔，旱地种植作物为花生。

从图 9 可以看出，有机碳分解速率为花生 > 桔园。花生是南方红壤区主要经济作物之一，近年来由于化肥大量投入，导致其土壤有机碳含量较高，而柑桔为南方红壤地区主要果树种类，是一种常绿果树，生长量大，周年需要消耗大量水分、养分^[15]，这样就导致

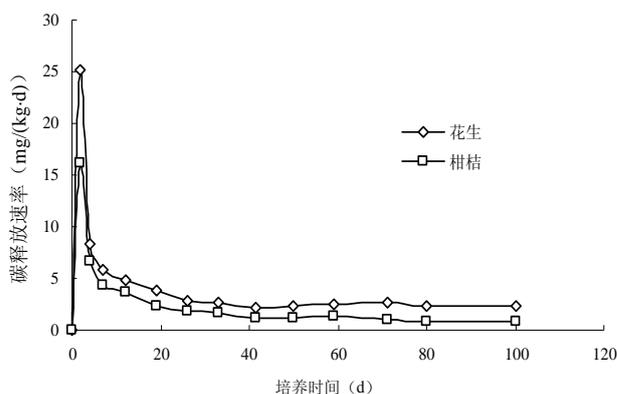


图 9 不同作物红壤有机碳分解速率

Fig. 9 Decomposition rates of soil organic carbon of red soils of different crops

土壤有机碳含量旱地显著高于果园。

3.1.2 不同种植方式土壤有机碳分解速率的比较

图 10 为菜园、旱地、水田、果园 4 种不同农田种植方式下土壤有机碳分解速率，可以看出，菜园 > 水田 > 旱地 > 果园。菜园土大量使用动物有机肥料频繁

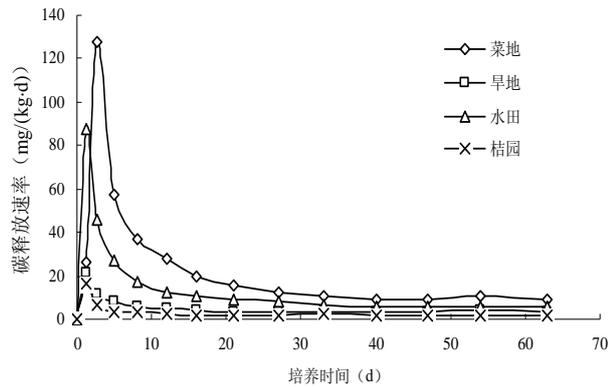


图 10 农田土壤有机碳分解速率

Fig. 10 Decomposition rates of farmland soil organic carbon

灌溉，使菜园土成为人工土壤中熟化度最高的土壤，导致其提供给微生物的养分也较多，大量蚯蚓等土壤动物的活动保证了上下土层间的物质交换和通气供氧，使得土壤中微生物活动频繁，再加上菜园土上的蔬菜需氧量高，要不断从土壤中吸取养分，使得菜园土的分解速率最大^[16]。水稻土在淹水缺氧的情况下，有机质分解比较缓慢，腐殖质程度高，肥效比较稳长，养分损失较少，即前期水稻土中简单的易分解有机碳较多，在短期内提供给微生物的养分也多，使得微生物活动剧烈并使分解速率

较大并且很快达到最高峰；反之，旱田土壤的有效碳含量较低，提供给微生物的养分较少，分解速率较低。

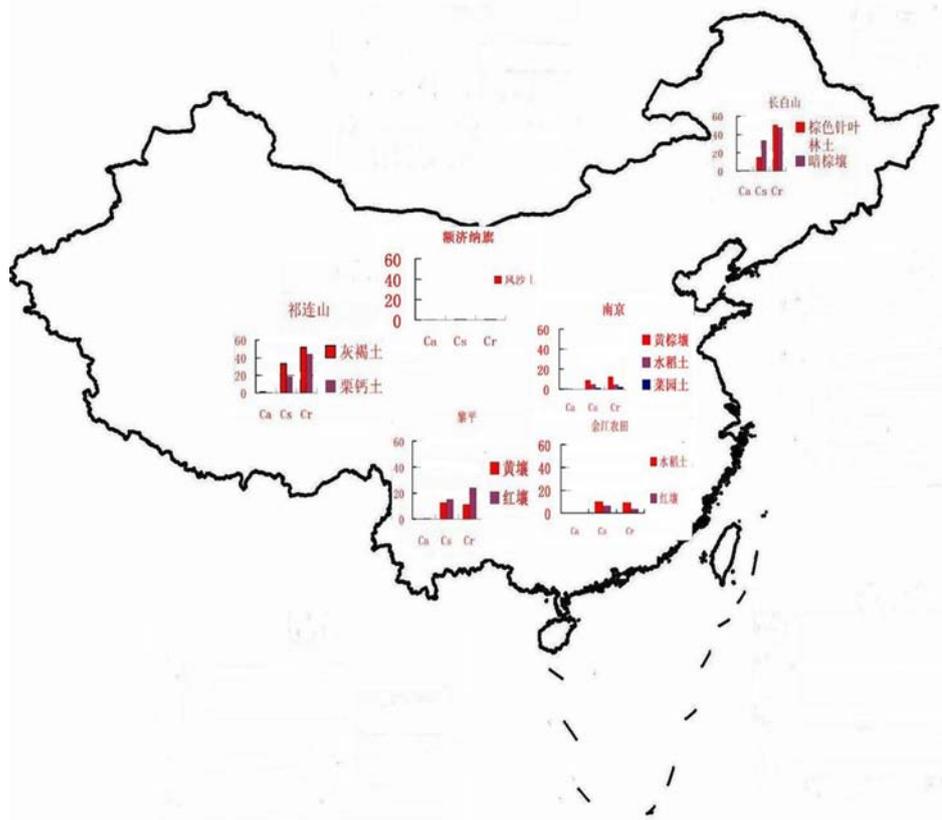
3.2 不同土壤类型碳库比较

表 7 列出了不同土壤类型的各个碳库及其驻留时间的平均值。比较后可见，有机碳含量呈现：灰褐土 > 暗棕壤 > 棕色针叶林土 > 栗钙土 > 红壤 > 黄壤 > 黄棕壤 > 余江的水稻土 > 余江的农田红壤 > 南京的水稻土 > 菜园土 > 风沙土；温带森林土壤 > 亚热带森林土壤 > 亚热带农田土壤 > 温带干旱土壤。活性碳含量是：温带森林土壤 > 亚热带森林土壤。风沙土的有机碳含量最低，但其 C_a/C_{SOC} 最大。活性碳在有机碳中占的比例大，说明这种土壤对有机碳的固定能力较弱。亚热带农田土壤的活性碳周转时间最短；缓效碳含量是温带森林土壤最高，风沙土的最低。棕色针叶林土的 C_r/C_{SOC} 最大，说明棕色针叶林土的惰性碳所占比例大，有较强的固碳作用。从图 11 更能直观地看出森林地区地带性土壤三库含量要远高于其他地区，农田土壤中水稻土三库的含量比旱地土壤高。土壤碳库对温室效应与全球气候变化有着重要的控制作用，并且现有的研究已初步表明水稻土在农业土地利用和全球固碳效益方面具有重要意义，水稻土的碳固定研究将成为陆地生态系统碳循环研究的热点^[17]。

表 7 不同土壤类型有机碳库及其驻留时间

Table 7 Soil organic carbon pools and turnover time under different soil types

地点	土壤类型	SOC (g/kg)	C_a (g/kg)	C_a/C_{SOC} (%)	MRT_{C_a} (d)	C_s (g/kg)	C_s/C_{SOC} (%)	MRT_{C_s} (a)	C_r (g/kg)	C_r/C_{SOC} (%)
长白山	暗棕壤	81.93	0.68	0.83	30	33.39	40.75	29	47.85	58.4
长白山	棕色针叶林土	67.78	0.80	1.18	15	16.41	24.21	6	50.57	74.61
祁连山	灰褐土	85.57	1.04	1.21	54	32.62	38.12	20	51.90	60.65
祁连山	栗钙土	62.34	0.30	0.49	33	18.51	29.75	11	43.82	70.31
黎平	黄壤	24.15	0.27	1.11	54	12.62	52.25	21	11.27	46.65
黎平	红壤	28.44	0.46	1.62	25	10.39	36.52	12	17.59	61.85
南京	黄棕壤	22.25	0.53	2.40	9	8.86	39.80	2	12.86	57.80
南京旱地	菜园土	3.50	0.14	4.08	8	1.07	30.51	2	2.282	65.33
南京水田	水稻土	9.74	0.30	0.03	7	4.81	0.49	1	4.63	0.47
余江水田	水稻土	19.67	0.48	2.45	9	10.10	51.20	7	9.11	46.31
余江旱地	红壤	10.31	0.09	0.83	9	6.53	63.31	9	3.70	35.85
额济纳旗	风沙土	2.31	0.49	21.35	41	0.90	39.0	5	0.92	39.65



(地图中柱形图的横坐标分别为活性碳库 (C_a)、缓效性碳库 (C_s)、惰性碳库 (C_r)；纵坐标为三库含量 (g/kg)

图 11 不同土壤类型有机碳库特征

Fig. 11 Characteristics of soil organic carbon pools under different soil types

4 结语

通过研究 6 个地区代表性土壤类型的有机碳分解速率变化，得出以下初步结论：

(1) 湿润亚热带地区森林土壤：南京地区土壤有机碳初始分解速率大小顺序为沼泽土>草甸土>棕色石灰土>普通黄棕壤；黎平地区土壤有机碳初始分解速率为常绿阔叶林黄壤>常绿阔叶林红壤；余江地区同一植被不同林龄红壤有机碳分解速率为杉木(32 年)>杉木(16 年)>杉木(5 年)；农田土壤为菜园>水田>旱地>果园。

(2) 湿润温带地区森林土壤：长白山有机碳释放速率：棕色针叶林土>暗棕壤；祁连山有机碳释放速率为：灰褐土>栗钙土。干旱温带地区森林土壤：额济纳旗风沙土有机碳分解速率顺序为：老年胡杨林>幼年胡杨林>千年胡杨林。

(3) 不同土壤类型有机碳平均分解速率：长白山森林土壤>祁连山森林土壤>黎平森林土壤>南京森林土壤>额济纳旗森林土壤；湿润温带地区(长

白山、祁连山)>湿润亚热带地区(南京、黎平、余江)>温带干旱地区(额济纳旗)。

(4) 6 个地区表层土壤有机碳含量范围为 2.31 ~ 81.93 g/kg ；活性碳含量范围为 0.09 ~ 1.04 g/kg ，占有有机碳总量的 0.03% ~ 21.35%，其周转时间范围是 9 ~ 54 天；缓效性碳含量范围为 0.90 ~ 33.39 g/kg ，占有有机碳总量的 0.49% ~ 63.31%，其周转时间范围为 1 ~ 29 天；惰性碳含量范围 0.92 ~ 47.85 g/kg ，分别占有有机碳总量的 0.47% ~ 74.61%。

参考文献：

- [1] 苑韶峰, 杨丽霞. 土壤有积碳库及其模型研究进展. 土壤通报, 2010, 41(3): 738-743
- [2] Jenkinson DS, Adams DE, Wilda. Modelles tiMRTfieldes of CO_2 emissions from soil in response to global warming. Nature, 1991, 351: 304-306
- [3] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544
- [4] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000:

- 42-43
- [5] Leavitt SW, Follett RF, Paul EA. Estimation of the slow and fast cycling soil organic carbon pools from 6 N HCl hydrolysis. *Radiocarbon*, 1996, 38: 230-231
- [6] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 24-28
- [7] Parton WJ, Schimel DS, Cole CV. Analysis of factors controlling soil organic carbon levels in Great Plains grasslands soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179
- [8] Lal R, Kimble JM, Follett RF. Assessment methods for soil carbon. Florida(USA): CRC Press LLC, 2001: 200-202
- [9] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 彭少麟, 李志安. 土壤碳循环研究进展. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 556-563
- [10] 史学军. 中国东部典型区域土壤有机碳和土壤凋落物分解特征的研究 (硕士学位论文). 南京: 南京农业大学, 2009
- [11] 何婷婷, 华璐, 张振贤, 徐振剑. 影响农田土壤有机碳释放的因子及固碳措施. *首都师范大学学报*, 2007, 28(1): 66-72
- [12] 李忠佩, 王效举. 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 365-370
- [13] 李海鹰. 实验室培养下中国亚热带和温带土壤有机碳分解特征的研究 (硕士学位论文). 南京: 南京农业大学, 2006
- [14] 邵月红, 潘剑君, 李海鹰. 农田土壤有机碳的分解动态变化研究. *池州师专学报*, 2005, 19(5): 6-8
- [15] 肖润林, 李玲. 覆盖对南方红壤桔园生态系统的影响. *长江流域资源与环境*, 1996, 5(1): 38-42
- [16] 张凤荣. 土壤地理学. 北京: 中国农业出版社, 2002: 270-273
- [17] 许信旺, 潘根兴. 中国水稻土碳循环研究进展. *生态环境*, 2005, 14(6): 961-966

A Preliminary Study on Characteristics of Soil Organic Carbon Decomposition in China

PAN Jian-jun, HAO Guang-cun, MENG Jing-juan

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: On the base of first order dynamics model, combining with a laboratory soil incubation experiment, decomposition characteristics of soil organic carbon (SOC) in China typical regions were analyzed. The results showed that there were two decomposition stages of SOC which with a faster decomposition at early stage and a slower one at the later stage. After two months of its equilibrium time, the amount of daily mean decomposition of SOC became very smaller. In the east region, decomposition rates of four zonal soils organic carbon increased with latitude. In these six areas, the total SOC pool contents ranged from 2.31 g/kg to 81.93 g/kg; the active carbon pool content ranged from 0.09 g/kg to 1.04 g/kg, slow carbon pool content ranged from 0.90 g/kg to 33.39 g/kg and the passive carbon pool content ranged from 0.92 g/kg to 47.85 g/kg.

Key words: China, Soil organic carbon, Characteristics of decomposition