

红壤稻田土壤溶解有机碳含量动态及其生物降解特征^①

焦 坤 李忠佩*

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 本文通过田间采样分析和室内培育试验,研究了不同利用年限的3种红壤水田土壤中溶解有机C (DOC)的含量动态和生物降解特征。结果表明:土壤DOC的含量随土壤深度而降低,二者具有显著负相关性。0~30 cm土壤DOC的含量及其占总C比例随土壤有机C含量的升高而增大。DOC的季节变化明显,主要与气候因素有关;降雨和灌水可显著提高DOC的含量,是落干时含量的1.44~2.50倍。淋溶试验结果表明,从试验开始,淋滤液中DOC的浓度呈增加趋势,至21天时达到最大,其后又趋下降。在49天的培养期内,DOC的分解速率为31%~58%,其中低分子量组分能在数天内降解掉。不同土壤间DOC的分解速率有明显差异。

关键词 红壤稻田; 溶解有机碳; 含量动态; 生物降解

中图分类号 S153.6

土壤溶解有机质一般指能通过0.45 μm微孔滤膜、大小不等、结构不同、能溶于水或稀酸稀盐溶液的一组有机物^[1]。溶解有机质在土壤的形成、养分迁移与释放中起着重要作用,其动态变化能更灵敏地反映土壤有机C的循环与平衡趋势。近年来其研究受到广泛重视,但主要是集中在森林土壤条件下,有一些研究报道了溶解有机质的组成和结构特征^[2];关于其在农田土壤中的季节变化和转化特征的研究尚报道较少。本文通过采集不同利用年限的3种红壤水田土壤,研究其溶解有机C (DOC)的含量动态和生物降解特征,结果可为正确阐明红壤水稻土有机C的循环与平衡状况提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于中国科学院红壤生态实验站。该站地处江西鹰潭市,属中亚热带季风气候区,年均温17.6℃,年降雨量1795 mm,年蒸发量1318 mm,降雨集中于每年的3~6月,无霜期261天。选择站区附近种植水稻3年、18年和80年的水田作为采样田块,代表了不同熟化程度的红壤水稻土;田块之间相距不超过500 m,除肥力水平有显著差异外,地形、母质等条件相对一致。土壤均发育于第四纪红色粘土。轮作制度为双季稻。

1.2 样品的采集与处理

于晚稻收割后,用土钻按0~15、15~30、30~50、50~70和70~100 cm分层采样,用于溶解有机C含量的剖面分布测定。采集0~15 cm土壤用于生物降解特征研究。动态监测试验所用土壤为0~15 cm的表层土,采样时间为2003年11月至2004年2月上旬,平均每10天采1次样,共计8次。用PVC管采集0~17 cm原状土,每个田块采3次重复,得到9个土柱,用于淋溶分析。

除用于淋溶试验的样品保持原状土外,其它样品均用塑料袋密封带回实验室,适度吹晾后,捡去植物残根和石块,混匀过2 mm筛。过筛后的样品保存在4℃的冰箱内供分析用。供试土壤的理化性状见表1。

1.3 试验方法

供剖面分布和动态变化测定的样品,按2:1的水土比加入重蒸馏水,振荡提取30 min,离心,0.45 μm滤膜过滤,测定滤液中的DOC含量。

生物降解特征:按1:1的体积比加入重蒸馏水,振荡提取30 min,离心,0.45 μm滤膜过滤,获得滤液;将150 ml滤液置于250 ml三角瓶中,并加入经37℃恒温箱中培养12 h的土壤悬液1.5 ml进行接种。然后,在25℃下培养49天,并在0、2、4、7、14、21、28、35、42、49天时取样测定DOC,每次取样每个处理均3次重复;并在0、7、14、28、49天取样时同时测定滤液在280 nm处的紫外吸收值。

①国家自然科学基金项目(40471066)和中国科学院知识创新工程重大方向项目(KZCX1-SW-01-05)资助。

* 通讯作者(zhpli@mail.issas.ac.cn)

淋溶动态：将 PVC 管底部的 2cm 土壤去除，用石英砂补足并用尼龙网固定。PVC 管置于玻璃漏斗上，用塑料管导引淋滤液到 250ml 的三角瓶中。第一次加重蒸馏水时，9 个土柱均加 200 ml。后续加水每 7 天 1 次，共 7 次，3 年、18 年和 80 年水稻土每次分别加 115 ml，92 ml 和 90 ml。在 7，14，21，28，35，42，49 天时收集淋滤液，测定 DOC 和 NH₄⁺-N 的浓度。

表 1 供试土壤的理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of paddy soils tested

利用年限 (年)	深度 (cm)	pH	C (g/kg)	N (g/kg)	C/N
3	0~15	5.61	7.02	0.87	8.04
	15~30	5.44	4.69	0.65	7.24
	30~50	5.37	4.77	0.60	7.99
	50~70	5.26	5.25	0.68	7.72
	70~100	5.19	6.17	0.70	8.78
18	0~15	5.68	10.3	1.25	8.21
	15~30	5.98	5.59	0.68	8.23
	30~50	5.39	2.64	0.45	5.89
	50~70	5.44	1.89	0.33	5.71
	70~100	5.41	1.33	0.32	4.09
80	0~15	5.33	22.9	2.79	8.22
	15~30	5.26	11.2	1.25	8.94
	30~50	5.78	5.33	0.67	8.01
	50~70	6.31	4.93	0.51	9.59
	70~100	6.14	3.87	0.59	6.56

1.4 测定方法

土壤有机 C 用丘林法；土壤全 N 用半微量凯氏法^[3]；水样 NH₄⁺-N 用靛酚蓝比色法^[4]；土壤 pH 用电位计法^[5]；滤液中的 DOC 直接用岛津 TOC-5050A 总有机碳仪测定。

2 结果与讨论

2.1 剖面分布

供试的 3 种不同利用年限的红壤水田土壤，代表了现实条件下不同熟化程度的红壤水稻土的肥力水平。剖面分析结果表明，利用 80 年的高度熟化水稻土，其土壤有机 C 含量比利用 3 年的熟化度低的水稻土高 226 %，而溶解有机 C 却高达 460 %。可见，溶解有机 C 能够更灵敏地反映土壤肥力水平的差异。结果还表明，不同肥力水平红壤水稻土 DOC 含量的剖面分布也有明显差异（图 1），肥力水平高

的土壤，DOC 含量的上下层差异更明显。DOC 含量随剖面深度变化的拟合方程为： $Y_3 = 8.342X^{-0.187}$ ， $r = 0.84^*$ ； $Y_{18} = 27.105X^{-0.449}$ ， $r = 0.972^{**}$ ； $Y_{80} = 154.27X^{-0.782}$ ， $r = 0.978^{**}$ ；式中 Y_3 、 Y_{18} 、 Y_{80} 分别为 3 年、18 年、80 年水稻土的 DOC 含量(mg/kg)，X 为取样深度。可见，不同利用年限水稻土 DOC 含量均随深度而降低，二者存在极显著或显著负相关性。但 30 cm 以下土壤 DOC 的含量趋于稳定。统计分析显示，DOC 与土壤有机 C 含量呈极显著正相关 ($R^2 = 0.909^{**}$ ， $n = 15$)。

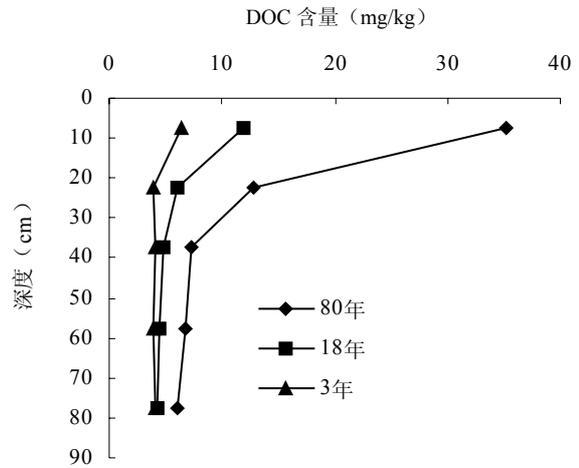


图 1 DOC 的剖面分布

Fig. 1 Variations of DOC concentration in soil profiles

土壤 DOC 的含量除与土壤有机 C 总量有关外，也受微生物分解以及土壤矿质部分对其吸附的影响。表层土壤中微生物活性较高，DOC 更多地被利用，而下层土壤微生物活性低，DOC 能够相对较多地保存下来，这可能是造成下层土壤中 DOC 占总有机 C (TOC)比例较高的主要原因（表 2），肥力水平越高，这种差异越明显。

表 2 DOC/TOC 的剖面变化 (%)

Table 2 Variations of DOC/TOC in soil profiles

利用年限 (年)	采样深度 (cm)				
	0~15	15~30	30~50	50~70	70~100
3	0.09	0.08	0.09	0.08	0.07
18	0.12	0.11	0.14	0.14	0.16
80	0.15	0.11	0.18	0.24	0.32

2.2 季节变化

不同时期采样的土壤 DOC 含量差异明显（图 2），最高和最低值相差 18 mg/kg（18 年水田）和 20

mg/kg (80 年水田), 其中, 2003 年 11 月 21 日、2003 年 12 月 21 日和最后一次采样的土壤 DOC 明显高于其它时间采样, 3 年水田土壤虽因 DOC 含量较低而致各次采样的土壤 DOC 差异较小, 但仍能看出与其它两个处理相同的变化趋势。80 年水田 DOC 的平均含量约 35 mg/kg, 18 年水田为 11 mg/kg, 3 年水田最低为 6 mg/kg。

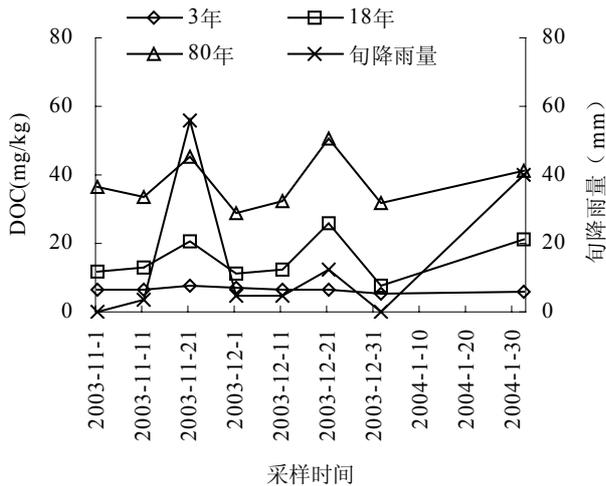


图 2 DOC 含量动态及其与降雨量变化关系

Fig. 2 Temporal variations of DOC concentration as a function of rainfall

比较表明 (图 2), 不同采样时间土壤 DOC 含量差异与降雨量变化有关。由于降雨增加土壤水分, 可能提高了 DOC 的含量^[6]。此外, 2003 年 12 月 21 日采样时, 18 年和 80 年水稻田在采样前灌过水。干湿循环能促进土壤 DOC 的释放^[7], 80 年水田处于淹水时土壤 DOC 的含量是水分排干 (好气) 条件下的 1.44 倍, 而 18 年水田则是 2.5 倍左右。这可能是灌水时土壤结构发生了变化, 由于水分的溶出和团聚体分散, 增加了进入土壤溶液的有机 C 量。因此, 土壤水分差异是影响土壤 DOC 含量变化的重要因素。作物的生长可能对土壤 DOC 含量也有影响^[8], 但采样期间, 采样田块的冬季紫云英生长很慢, 对土壤 DOC 不会产生明显影响。

2.3 淋溶动态

随着不断加水淋溶, 进入溶液的有机 C 量增加, 至 21 天时达到最大, 其后再呈下降趋势 (图 3)。淋溶过程中 DOC 的含量变化反映了有机 C 在固液相之间, 以及在剖面迁移过程中的吸附-解吸状况。在淋溶初期, 土壤水存在优势流, 和土壤固相的作用时间短, 并且, 上层土壤水中的 DOC 在向下迁移

时被下层土壤吸附; 随着淋溶过程进行, 在第 2 次加水时 (7 天), 土壤处于水分饱和状态, 水分溶解固相中有机 C 的时间较长; 这可能是导致淋溶前期 DOC 含量增加的主要原因。到 21 天时, 解吸达到最大值, 随后溶解出来的 DOC 逐渐减少, 并稳定在较低水平上。在其它类型土壤上进行的试验也获得类似的结果^[9]。3 年水田土壤有机 C 含量较低, 淋溶过程中 DOC 的浓度变化较不明显, 但趋势相同。

此外, 淋溶过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量变化与 DOC 相似 (图 4), 表明 DOC 的变化可能会影响到其他养分离子的释放。

2.4 降解速率

结果表明 (图 5), DOC 的降解速率在培养初期最快, 之后迅速下降, 14 天后趋于稳定。3 年水田土壤 DOC 的降解速率在初始 4 天最快, 降解量占总 DOC 的 24.2%, 培养结束时, 降解量占总 DOC 的 30.9%。80 年水稻土 DOC 的降解速率在初始 4 天略慢于 3 年的水稻土, 降解量占总 DOC 的 22.5%, 但在 4 ~ 14 天仍保持了较高的降解速率, 培养 14 天后, 降解量占总 DOC 的 38.4%, 培养结束时, 降解量占总 DOC 的 42.0%。18 年水田土壤 DOC 的降解速率在初始 7 天最快, 降解量占总 DOC 的 51.7%, 培养结束时, 降解量占总 DOC 的 57.8%。

280 nm 处 DOC 的紫外吸收值可反映其芳环物质的含量状况^[10]。从图 6 可以看出, 不同降解阶段 DOC 的紫外吸收值先呈上升, 达到最大值后又趋下降的趋势, 表明 DOC 中不同组分的分解程度各异, 导致芳环物质所占比例发生明显变化。溶解有机质由碳水化合物、脂肪、羧基化合物、芳环物质等组成^[1], 不同组分物质被微生物利用的难易程度有显著不同, 碳水化合物最先被微生物利用, 因此, 分解前期芳环物质比例增高, 当其它容易分解的物质被分解完后, 微生物开始利用芳环物质, 而致其比例下降。

18 年水田土壤 DOC 的降解速率最快, 可能与该田块曾大量施用秸秆, 其中容易分解的组分比例较高有关。

3 小结

土壤 DOC 含量随土壤深度增加而降低, 30 cm 以下趋于稳定。不同季节土壤 DOC 含量变化明显, 主要与水分状况的差异有关, 稻田灌水后土壤 DOC 含量是落干时的 1.44 ~ 2.5 倍。DOC 较易被微生物

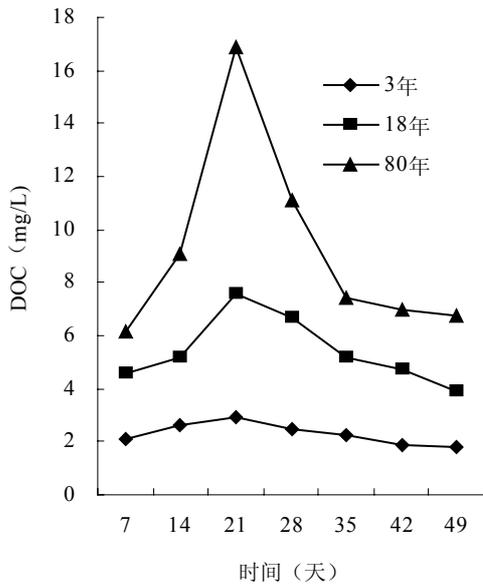


图 3 淋溶过程中 DOC 的浓度变化

Fig. 3 Variations of DOC concentration during leaching

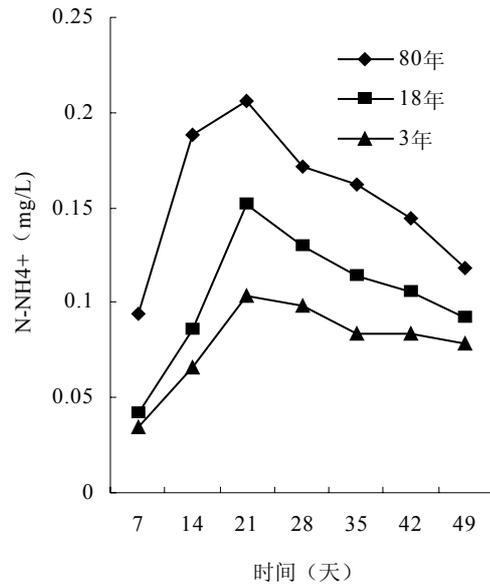


图 4 淋溶过程中 NH₄⁺-N 的浓度变化

Fig. 4 Variations of NH₄⁺-N during leaching

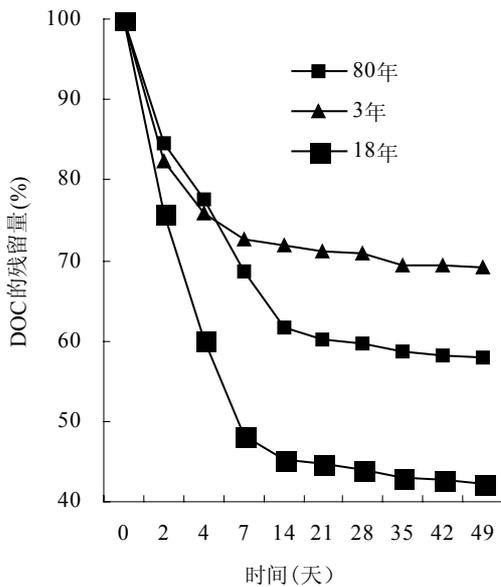


图 5 培养过程中 DOC 的残留量

Fig. 5 DOC remaining during the incubation

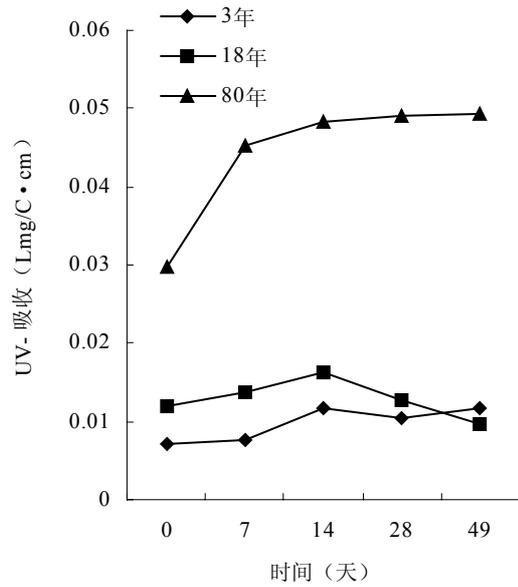


图 6 培养过程中培养液在 280nm 处的紫外吸收

Fig. 6 Temporal variations of the specific absorption at 280 nm during the incubation

利用, 在 49 天的培养期内, 分解速率达到 31%~58%, 不同肥力水平的土壤之间有明显差异, 其组成中也包括易降解和难降解两个部分, 前者可在数天内降解完毕。由于 DOC 含量受水分状况影响, 对我国南方的水田土壤具有重要的现实意义, 表明水田

灌排水可能导致 C 循环过程的显著变化, 进而影响土壤有机 C 转化和养分供应。但 DOC 的含量及转化过程也受包括气候、土壤性质、农事活动等自然和人为因素的综合影响^[11, 12], 要正确阐明其变化规律还需要进行更深入的研究工作。

参考文献

- 1 Kalbitz K, Solinger S, Park JH, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165 (4): 277 ~ 304
- 2 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 土壤中水溶性有机质的结构特征及其与富里酸、胡敏酸的比较. *土壤*, 2004, 36 (1): 46 ~ 50
- 3 文启孝主编. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社, 1984, 318
- 4 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- 5 刘光崧主编. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996, 266
- 6 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544 ~ 552
- 7 Lundquist EJ, Jackson LE, Scow KM. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. *Soil.Biol. Biochem.*, 1999, 31 (7): 1031 ~ 1038
- 8 陈有镒, 黄艺, 陶澍. 玉米和大豆根际土壤性质的动态变化. *植物生态学报*. 2002, 26 (3): 283 ~ 287
- 9 Münch JM, Totsche KU, Kaiser K. Physicochemical factors controlling the release of dissolved organic carbon from columns of forest subsoils. *Europ. J. Soil Sci.*, 2002, 53 (6): 311 ~ 320
- 10 Kalbitz K, Schwesig D, Schmerwitz J, Kaiser K, Haumaier L, Glaser B, Ellerbrock R, Leinweber P. Changes in properties of soil-derived organic matter induced by biodegradation. *Soil.Biol. Biochem.*, 2003, 35 (8): 1129 ~ 1142
- 11 俞元春, 李淑芬. 江苏下蜀林区土壤溶解有机碳与土壤因子的关系. *土壤*, 2003, 35 (5): 424 ~ 428
- 12 Ni JZ, Xu JM, Xie ZM, Wang DJ. Changes of labile organic carbon fractions in soils under different rotation systems. *Pedosphere*, 2004, 14 (1): 103 ~ 110

DYNAMICS AND BIODEGRADATION OF DISSOLVED ORGANIC CARBON IN PADDY SOILS DERIVED FROM RED CLAY

JIAO Kun LI Zhong-pei

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Abstract Dynamics and transformation of dissolved organic carbon (DOC) in paddy soils of the red soil region were studied by sampling analysis and laboratory incubation. The results showed that DOC content decreased significantly with soil depth. DOC content and DOC/TOC(%) in 0~30cm layer increased with soil organic carbon content. Irrigation and rainfall could increase soil moisture. As a result DOC was 1.44 to 2.5 times higher under irrigation (submersion) than drainage (aerobic condition). During the 49 days of incubation, decomposition rate of DOC was 31%~58%, which differed from soils. Low molecular fractions could be mineralized in a few days.

Key words Paddy soil in red soil region, Dissolved organic carbon (DOC), Dynamics, Biodegradation