

土壤溶解有机质的含量动态及转化特征的研究进展^①

焦 坤^{1,2} 李忠佩^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 溶解有机质是土壤有机质的重要组成部分, 由于其活性较高, 可能在土壤 C 循环过程中发挥相较于其含量所占比例更高的作用。本文根据文献资料, 分析了目前关于土壤溶解有机质来源、组成、含量动态及转化特征的研究现状, 提出了未来研究的重点。

关键词 土壤; 溶解有机质; 含量动态; 转化; 进展

中图分类号 S153.6

土壤溶解有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是由一系列大小、结构不同的分子组成的, 且能通过 0.45 μm 微孔滤膜的, 能溶于水的有机物的总称^[1]。它是土壤有机质的重要组成部分, 受植物和微生物影响强烈, 在土壤中移动较快, 易分解矿化, 微生物的有效性较高。农田土壤 DOM 含量一般不会超过 C 100 mg/kg, 森林土壤 DOM 含量从几个到几百个 C mg/kg 不等, 总的看来, 森林土壤 DOM 含量高于农田土壤^[2]。DOM 的总量虽然较低, 但活性较高, 其含量动态及化学行为显著地影响着其他养分元素如 N、P、S 等的循环、重金属的吸附、环境有机污染物的降解、以及矿物的风化和土壤形成等, 在陆地生态系统和水生态系统的生物地球化学过程中起着重要的作用。基于以上认识, 晚近以来各国科学家对此开展了大量的工作, 在 DOM 的来源、组成、含量动态、转化特征等方面取得诸多重要成果。

1 溶解有机质的来源

一般而言, 土壤中 DOM 来源于透冠水包含的有机物、新近凋落物和残根的分解产物, 以及土壤腐殖质, 但哪一部分的贡献更大尚不清楚。有研究认为相对于新近凋落物而言, 通过透冠水的淋溶物和土壤腐殖质的降解产物对森林地被物中 DOM 的贡献率更大^[3]。Zsolnay^[4]也认为 DOM 来源于土壤腐殖质的比例比凋落物高。然而, 有文献报道在落叶林生态系统中, DOM 最大净增通量出现在森林地被

物的上层(凋落物层 Oi)^[5]。此外, Qualls 和 Haines^[6]于 12 月份采样(刚过最大落叶期)测定结果显示, 亲水中性 DOM 的浓度异常高。一般认为 DOM 中亲水中性部分主要是由单糖和非腐殖化的多糖组成, 因此, 上述结果可表明新近凋落物是造成 DOM 季节性含量变化的一个重要因素。Huang 等^[7,8]和 Michalzik 等^[9]研究发现有机层(Oi) DOM 的浓度最高。有机层下部是有机溶解物的沉降库, 使得由此向下的 DOM 流量急剧减少。Currie 和 Aber^[10]研究结果表明淋溶物中 DOM 的主要成分是森林地被物中不稳定组分, 据此在 DOM 的模型研究中没有考虑腐殖质的作用。由于根系及其分泌物的周转, 根际也会出现大量不稳定的有机物^[11,12], 这可能会增强微生物的活性。由此可见, 可能有相当多的 DOM 来源于这一地下 C 库。然而, 目前还未发现能够直接测定来自根系的 DOM 所占土壤 DOM 比例的方法。土壤微生物生物量非常不稳定, 很可能也是 DOM 的一个重要来源。近来 DOM 的结构分析表明微生物代谢产物是 DOM 的重要组分。DOM 中碳水化合物结构与植物残渣和腐殖质中的不同, 其戊糖含量低于己糖和脱氧糖类, 这与植物残渣和腐殖质中的情况相反。而微生物细胞中戊糖很少见^[13,14]。

2 溶解有机质的组成

土壤 DOM 的组分中在化学上能够鉴别的仅占很少一部分, 主要是低分子量有机物质, 如有机酸、

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要方向项目(KZCX3-SW-417)资助。

* 通讯作者(zhppli@mail.issas.ac.cn)

糖、氨基酸等^[15]；大部分是复杂的高分子物质，也就是腐殖质。目前得到较一致认同的一种组成区分方法是由 Leenheer 等^[16]提出：由于有机分子具有极性和带电荷，它们与 XAD 树脂和阴阳离子交换树脂发生相互作用而分离，据此可以区分出 DOM 中的 6 个组分：①疏水酸性组分（HPOA）：与土壤中的富里酸和胡敏酸大体相似；②疏水碱性组分（HPOB）：主要有芳香族胺类等；③疏水中性组分（HPON）：主要包括碳水化合物、长链脂肪酸、烷基醇和带有少量功能团的腐殖质等；④亲水酸性组分（HPIA）：包括低分子量的及高羟基/碳比

（COOH : C）的腐殖质和非腐殖质，如羧酸等；⑤亲水碱性组分（HPIB）：包括蛋白质等；⑥亲水中性组分（HPIN）：包括单糖、醇和非腐殖质结合的多糖等。

Vance 等^[17]根据以上方法对森林生态系统土壤溶液中的有机物进行了分离，各种组分的含量及性质见表 1。由表 1 可以看出，在森林生态系统中 DOM 的酸性组分占绝对优势，中性组分其次，碱性组分最少。农田生态系统中土壤 DOM 的组成情况文献中未见报道。

表 1 森林土壤中 DOM 的组成、化学性质和含量

Table 1 Composition, chemical properties and concentration of DOM in forest soils

DOM 组分		组成	化学性质	含量 (%, DOM)
疏水性	酸	单环芳香族酸；	交换性酸度为 8 ~ 12 $\mu\text{eq}/\text{mg C}$ pH 取决于电荷密度	30 ~ 70
		芳香酸和含多功能团酸		
	碱	及苯酚的混合物；		<1
		复杂脂肪族羧酸		
	中性物	多环胺，醚和酞；		≤ 15
		卟啉类		
	亲水性	烃；高级醇，氨基化合物，		30 ~ 50
		酯和酮类		
	酸	简单脂肪酸；	交换性酸度为 10 ~ 14 $\mu\text{eq}/\text{mg C}$ pH 取决于电荷密度	5 ~ 10，含量稳定
		脂肪酸和含多功能团的芳香族酸及酚的混合物		
	碱	两性蛋白化合物；		≤ 12
		氨基酸和糖类		
	中性物	碳水化合物；		
		含多功能团的醇类		

Marschner 等^[18]根据 DOM 的分子量大小将其分为 <1 kDa、1 ~ 10 kDa 和 >10 kDa 的 3 种组分。研究发现 >10 kDa 组分的紫外吸收相对稳定。还有研究者将提取的 DOM 进行培养，通过其生物降解过程中矿化速率的变化将其分为难降解性和易降解性两个组分^[19]。

3 溶解有机质动态变化的影响因素

3.1 土壤有机质总量

土壤有机质的总量及组成结构状况可能对 DOM 有显著的影响，但目前尚没有一致的结论。Gregorich 等^[20]研究表明，土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与

DOM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值非常相似，因此认为土壤有机质是影响 DOM 的主要因素。Hagedorn 等^[21]也得到相似的结论。Tipping 等^[22]在田间试验中观察到土壤有机质高的土壤，DOM 输出量大。Haynes 等^[23]在研究中发现土壤有机质含量越高，风干土与鲜土中 DOM 的含量差别越大。一般认为土壤腐殖质是 DOM 的最主要也是最稳定的来源，但不同组分对 DOM 的贡献不同，腐殖酸在水中的分子量分布范围与 DOM 非常接近，因而理论上 DOM 主要来自腐殖酸^[24]。许多室内和野外试验研究结果发现 DOM 含量与总有机质含量成正相关^[25]，然而，也有结果显示两者的相关性并不显著^[26, 27]。

3.2 水分状况

土壤水分状况是影响 DOM 的重要因素之一。这方面的研究集中在干湿循环过程中 DOM 的含量变化上。比较一致的结果是土壤干燥后再重新湿润将会提高 DOM 的浓度。其机理可能是土壤干燥过程中, 微生物的活动受到限制, 对底物的降解速率下降, 并且降解不完全, 促成了 DOM 的积累, 再加上细胞死亡和分解, 导致了当土壤水分增加时, DOM 含量的提高。另外, 土壤复湿可能导致团聚体的分散, 增加 DOM 的溶出。Lundquist 等^[28]发现干湿循环提高了土壤 DOM 的含量, 并给出了 3 种可能的原因: ①强烈的干湿循环大大减少了微生物的数量, 因此, 降低了微生物对 DOM 的降解。但在实验中却发现干湿循环的土壤中微生物生物量 C 比始终保持湿润的土壤中的含量高。或许解释为强烈的干湿循环使得相当多的微生物处于近似休眠状态, 从而使得其对 DOM 的利用降低更为合理。②强烈的干湿循环加强了微生物生物量的周转和微生物代谢产物的聚合, 从而增加了难降解的 DOM 的含量。③干湿循环破坏了土壤结构, 使以前被固持的有机质变为 DOM。这一机理可能是土壤结构的破坏增加了不溶性有机质与微生物接触的机会, 使不溶性有机质在微生物的作用下变为 DOM; 也可能是土壤结构的破坏增加了潜在 DOM 与土壤溶液的接触面积, 促进了库中的潜在 DOM 进入土壤溶液。

土壤水分含量不同影响着 DOM 的释放。Schaumann 等^[29]通过土柱淋溶试验, 从土壤有机质的胶体性质方面提出了水分对 DOM 释放的影响: 土壤有机质水化后形成胶体结构, 水化时间和水化程度影响着胶体结构的刚性, 进而影响了 DOM 的释放。DOM 在胶体内扩散可能会被胶体固定。Tyler 等^[30]和 Christ 等^[31]报道土壤水分含量与 DOM 浓度存在正相关性。对这一现象的解释是: 土壤水分增强了微生物的活性, 进而促进了 DOM 的形成。然而, Guggenberger 等^[32]发现二者无相关性。

许多研究发现淹水条件下 DOM 的含量比非淹水条件下高。淹水条件下有机质降解不彻底, 中间产物中可溶性有机物占有相当高的比例, 增加了 DOM 的浓度^[33, 34]。

3.3 黏土矿物

随着土层深度的增加, 有机质和生物活动减少, 黏土矿物的物理吸附作用成为影响 DOM 含量和组成的主要因素。下层土壤中 DOM 的浓度相对于表

土来说要低得多^[35]。DOM 按其亲水性与疏水性分为两部分, 黏土矿物优先吸附疏水性 DOM^[36], 其驱动力是熵值的减少。黏土矿物的类型影响其对 DOM 的吸附, 高岭石类对 DOM 的吸附力大于伊利石类。矿物表面积是影响其吸附力的一个关键因素^[37], DOM 在吸附剂上的吸附有一个最大值, 表明吸附位点是有限的^[38~40]。

3.4 pH

DOM 以酸性组分为主, 降低 pH 将会使其表面电荷密度增大而溶解性降低。同时, pH 降低限制了微生物的活动, 也可能使 DOM 的生物降解速率下降。Tipping 和 Woof^[41]计算得出土壤 pH 每提高 0.5 个单位就会增加 50 % 的可移动的 DOM。因此, DOM 的溶解会随 pH 的降低而减少^[42]。在矿质土壤中, DOM 的含量要少得多, 质子与 DOM-金属络合物相互作用, 增强了 DOM 的溶解性^[43~45]。pH 的变化也使溶液中 DOM 的组成发生了变化。用酸溶液淋洗灰化土土柱时, 淋溶液中 DOM 的疏水酸组分减少了, 而亲水酸组分则相应地增加了^[46]。

3.5 无机离子

土壤溶液中的无机离子可能会影响到 DOM 的移动性。无机离子与 DOM 相互作用的机理可能是阳离子桥、阴离子置换和络合配位键交换。有机分子的阴离子功能团与土壤溶液阳离子发生化学作用, 降低了有机分子的表面电荷密度, 改变了有机分子的构型, 从而降低了有机分子的溶解性。此外, 多价阳离子通过阳离子桥使有机分子结合在一起产生絮凝, 或使有机分子通过阳离子桥结合在吸附剂的阴离子的吸附位点上, 从而降低了有机分子的溶解性^[47]。Fe、Al 的氧化物和水化物是土壤可变电荷的最主要来源, 因此土壤铁铝氧化物或水化物与被吸附的 DOM 具有数量相关性。Gu 等^[37]报道吸附在铁氧化物上的 DOM 有 72 % ~ 92 % 被永久性地固定。McDowell 和 Wood^[48]发现当加入 Al 和 Fe 的盐溶液时, DOM 在 B 层上的吸附量明显变大, 这与阳离子桥机理相吻合。Mulder 等^[49]发现加入铝盐溶液显著降低了灰土 B 层中 DOM 的溶解释放。即使在不含土壤的土壤提取液中, 加入铝盐溶液也会使 DOM 沉降。Römken 和 Dolfing^[50]研究表明, Ca 能促进高分子量 DOM 的沉降, 但低分子量的 DOM 不受影响。土壤溶液中的阴离子, 如 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} , 与 DOM 竞争土壤上的吸附位点^[35~37]。阴离子通过从吸附位点上置换 DOM 而增强其移动性。置换能

力与其化合价有关, $\text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ [37, 51]。很多研究证实了 PO_4^{3-} 的置换效果, 即使 PO_4^{3-} 的浓度比其他阴离子低一个数量级时也比其他阴离子置换能力强 [37]。Kaiser 和 Zech [52] 研究发现在酸性森林土壤中, DOM 比 SO_4^{2-} 更容易被土壤吸附, 只有 SO_4^{2-} 离子的浓度在 $> 10 \text{ mmol/L}$ 时, 才能将 DOM 从吸附位点上置换下来。

3.6 气候因素

土壤有机 C 库与气候有着显著相关性, 温度有可能是影响土壤 DOM 释放的因素。Liechty 等 [53] 推测温度变化 2.1°C 将会使森林地被物溶液中 DOM 的浓度提高 16%。研究发现 DOM 的浓度夏季高于冬季 [54, 55]。Cronan 和 Aiken [56] 发现夏季表土土壤溶液中 DOM 的浓度比冬季高 26% ~ 32%, 但 B 层中 DOM 的浓度相对稳定。其他研究者也发现亚表土中 DOM 的浓度较稳定 [6]。这说明温度升高使微生物活动增强是引起 DOM 浓度具有季节性变化的主要因素。但 Andersson 等 [57] 认为温度升高改变了土壤溶液的性质, 或微生物因养分限制而死亡降解可能也促进了 DOM 的释放。

然而, 也有研究发现 DOM 的浓度季节变化不明显 [58, 59]。此外, 有研究者报道 DOM 的最大浓度在全年的任意时间都可能出现 [60]。

Mcdowell 等 [48] 在灰土上收集水样测定表明, A 层中 DOM 的浓度从 4 ~ 9 月增加, 而 10 月略有下降, 最高浓度出现在干旱时期, 其季节变化明显。淋溶作用差异可解释 A 层 DOM 的季节变化, 春季雨水多, 水作用时间短, 收集的水样中 DOM 的浓度低; 夏季雨水少, 作用时间长, 水样中 DOM 的浓度高。

3.7 土地利用方式与施肥

一般情况下, 森林土壤表土中 DOM 的含量高于农田土壤 [2]。然而, 森林改为农田后, 在耕作初期阶段 DOM 的含量会提高 2 ~ 5 倍; 然后, 随耕作年限的增加 DOM 的含量降低。种植玉米 26 年后, DOM 的含量低于附近的森林土壤 [61]。

施用石灰对森林土壤 DOM 的影响已做了许多研究。多数情况下, 施用石灰会提高有机土层中 DOM 的含量, 其原因可能是 pH 变大提高了 DOM 的溶解性或是促进了微生物的活动 [62], 也可能是这两个因素综合作用的结果 [63]。然而, 也有人报道施用石灰对 DOM 的含量没有影响 [64], 或施用石灰使 DOM 的含量降低 [65], 其原因是施用石灰促进了

DOM 的降解或由于提高了离子强度和 Ca^{2+} 含量导致了 DOM 的固定。

农田土壤施用有机肥能使 DOM 的含量提高 2.7 ~ 3.2 倍 [66~68]。这可能是直接加入了 DOM 所致 [4]。土壤施用粪肥后 DOM 的含量会迅速升高, 而后慢慢降低 [67]。施用有机肥的土壤 DOM 含量高于施用化肥的土壤 [28]。

总体而言, 土壤中 DOM 的含量变化受诸多人为和自然因素的影响, 特别是在田间条件下, 其动态变化过程是十分复杂的。Kalbitz 等 [1] 根据多数人的研究结果, 总结了影响 DOM 含量变化的主要因素 (表 2)。

4 溶解有机质的生物降解

土壤有机质由生物有效性不同的各组分组成, 水溶性的有机质较易为微生物利用, 而固相中的有机质较难分解。一般认为, 有机质的解聚和溶解是其矿化的先决条件, 有机 C 在转化为 CO_2 、 CH_4 前必须先进入溶液中, 水分是微生物活动所必需的。微生物对 DOM 的利用包括两个交替或连续的过程: ①微生物对 DOM 的同化吸收; ②为获取能量和无机养分而完全分解 DOM 成 CO_2 或 CH_4 。

目前测定 DOM 生物可降解性的方法不完全一致。多数研究采用培养法, 但具体步骤有差异: ①培养类型: 有批量培养和连续生物反应器培养等; ②培养器皿的类型和大小; ③摇床或静止培养; ④培养时间长短; ⑤DOM 的起始浓度; ⑥是否添加养分; ⑦接种体的类型和数量; ⑧温度; ⑨生物降解性指标: CO_2 的释放量, DOM 残留浓度变化; ⑩培养过程中的采样次数。每个步骤的差异都会对 DOM 生物可降解性的测定结果产生影响, 如培养过程中采用摇床法将会破坏真菌的生长而使生物降解性的测定值偏低, 而培养时间延长通常会使其降解性测定值偏高。

Block 等 [69] 测得土壤溶液和河水水样中的 DOM 有 24% ~ 39% 可被降解。Qualls 等 [70] 接种环境天然菌, 将森林降水、土壤溶液和河水 DOM 培养 134 天, 一般只有 14% ~ 33% 被降解掉。不同来源 DOM 的降解速率大小为: 垂直降水 $>$ Oi 层 $>$ B 层 $>$ 河水 $>$ AB 层 $>$ 腐殖酸 $>$ A 层上部。总体来看, DOM 的降解速率随土壤深度变大而减小。农田土壤 DOM 的降解性一般高于森林土壤 [71]。DOM 的降解性也与它的分子大小有关。Meyer 等 [72] 研究发

表 2 室内和野外研究中 DOM 含量和通量的影响因素*

Table 2 Factors controlling DOM concentration and flux in soils in laboratory and field

		含 C 量较高的上层土壤和森林地被物			含 C 量较低的下层土壤		
		室内测 得含量	野外测 得含量	野外通 量状况	室内测 得含量	野外测 得含量	野外通 量状况
固相性质	凋落物数量		+	+			
	有机质含量	+	+	+	+	+	+
	针-阔叶林比	==	++	+		+	+
	C-N	+	-	-			
	微生物活性	+	+	-			
	真菌数量	+	+	-			
	铁铝氧化物-氢氧化物	==	=	=	==	=	=
	黏粒含量	==	+=	+=	==	+=	+=
液相性质	pH	++	-	-	++	-	-
	离子强度	==					
	SO ₄ ²⁻	-			+		
	PO ₄ ³⁻	++			+		
	其他阴离子	-			-		
	高价阳离子	=			==		
环境条件	温度	++	++	-	-		
	干湿交替	++	++	+			
	水分饱和度	++	++	+			
	水流量	-	-	+		+=	++
	冻融（雪融）	++	++	++		++	++
	N 沉降	-	-	-	-	-	-
	皆伐		+	+		+	+
	施用石灰	++	++	++	-	-	-
	施用有机肥	++	++	++	-	-	-

++极显著的正影响； +正影响； ==极显著的负影响； =影响； -无影响。

* 表中显示的各种因素的影响是指多数情况下，某一具体因子的影响作用，不同研究者得到的结果可能不同。

现表现分子量>10000 的 DOM 都是不能被微生物利用的，而<1000 的 DOM 中有 86 % 是可降解的。Wagai 等^[73]研究发现淋滤液中可降解的 DOM 占总量的 13 % ~ 16 %，提取液中可降解的 DOM 占总量的 18 % ~ 27 %。

DOM 的降解速率随培养过程发生变化。易降解组分降解非常迅速。水提取液的亲水中性组分约 15 % 能在 3 天内降解掉^[74]。落叶林表层土壤中水提取的 DOM 能在 2 周内降解 22 %，而玉米田达 29 %^[71]。混交林 A 层淋溶的 DOM 在 48 h 可降解 28 %，4 天可降解 50 %^[75]。Yano 等^[76]报道 O 层淋溶的 DOM 在 5 h 内可降解 10 % ~ 45 %。

影响 DOM 生物降解性的因素分为 3 类：DOM 的内在性质、土壤和溶液的性质及环境条件。

DOM 的性质是其生物可降解性变化的主要影响因素。较稳定的 DOM 的性质是：在分离过程中 XAD-8 树脂吸附组分多，含芳环结构多，结构复杂，但碳水化合物含量少^[77~80]。反过来，生物降解也改变了 DOM 的性质，这可能是形成稳定土壤有机质的关键。降解过程中出现了芳香性有机物的相对富集。这种富集与 DOM 的矿化量有显著相关性，表明芳香性有机物是相对稳定的，其降解速率慢。培养过程中木质素二聚体降解为单体，芳香烃分解并出现酚类物质。培养过程中高分子物质因部分降解

含量减少了,同时,溶液中出现了较多的低分子量有机物和微生物代谢产物。在培养初始阶段,微生物优先降解碳水化合物,而且在后续的降解过程中,溶液中出现了微生物的代谢产物碳水化合物和肽的积累,其可能原因是:①这些化合物结合到稳定的 DOM 上,使其不能被微生物利用;②降解过程中,微生物的组成发生了变异,即不利用这些化合物,而去降解溶液中剩余的,更稳定的 DOM。培养实验结束时,DOM 的性质发生了明显的改变,其组成在芳香性、碳水化合物含量和热稳定性方面都相对稳定。DOM 的降解使其具备了形成稳定有机质所必需的结构,其结构的改变也使得 DOM 更难降解。

土壤溶液中 Al、Fe、Ca 和重金属离子对 DOM 生物降解性的影响不同研究者得出不同的结论。金属离子降低 DOM 生物降解性可能是金属离子与 DOM 络合使其失活,而增强其生物降解性可能是金属离子使 DOM 絮凝,这有利于微生物的着生和形成菌落。环境因子,如植被、利用方式和季节变化等其他因子也影响着 DOM 的生物降解性。

5 结语

综合起来看,目前 DOM 的研究呈方兴未艾之势。尽管在其来源、组成、含量动态以及转化特征等方面发表了大量的研究结果,特别是 DOM 在土壤 C、N 转化和元素的生物地球化学过程中的作用日益受到重视,但总体来说,以下方面仍有待进一步探索:①由于不同研究者的采样和提取测定方法不同,使得结果很难进行相互比较,因此研究方法需要规范和有针对性;②室内试验和田间试验结果有时差别很大,甚至相反,其具体原因还不清楚;③DOM 的形成、降解机制和影响因素;④DOM 在不同土壤类型和不同环境条件下的含量和形态变化特征;⑤以往的研究主要集中在森林土壤中,农田土壤方面尚较薄弱;⑥DOM 动态与土壤 C 循环和温室气体释放之间的明确的数量关系。

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 Sci.*, 2000, 165: 277 ~ 304
- 2 Seto M, Yui S. The amounts of dissolved organic carbon in the soil solution of a forest and a farm soil in situ. *Jpn. J. Ecol.*, 1983, 33: 305 ~ 312
- 3 McDowell WH, Likens GE. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. *Ecol. Monogr.*, 1988, 58: 177 ~ 195
- 4 Zsolnay A. Dissolved humus in soil waters. In: Piccolo A. ed. *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, 1996, 171 ~ 223
- 5 Qualls RG, Haines BL, Swank WT. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest. *Ecology*, 1991, 72: 254 ~ 266
- 6 Qualls RG, Haines BL. Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1112 ~ 1123
- 7 Huang WZ, Schoenau JJ. Distribution of water-soluble organic carbon in an aspen forest soil. *Can. J. For. Res.*, 1996, 26: 1266 ~ 1272
- 8 Huang WZ, Schoenau JJ. Fluxes of water-soluble nitrogen and phosphorous in the forest floor and surface mineral soil of a boreal aspen stand. *Geoderma*, 1998, 81: 251 ~ 264
- 9 Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem. *Eur. J. Soil Sci.*, 1999, 50: 579 ~ 590
- 10 Currie WS, Aber JD. Modeling leaching as a decomposition process in humid montane forests. *Ecology*, 1997, 78: 1844 ~ 1860
- 11 Edwards NT, Harris WF. Carbon cycling in a mixed deciduous forest floor. *Ecology*, 1977, 58: 431 ~ 437
- 12 Vogt KA, Grier CC, Meier CE, Keyes MR. Organic matter and nutrient dynamics in forest floors of young and mature *Abies amabilis* stands in western Washington, as affected by fine-root input. *Ecol. Monogr.*, 1983, 53: 139 ~ 157
- 13 Guggenberger G, Zech W, Schulten HR. Formation and mobilization pathways of dissolved organic matter: Evidence from chemical structural studies of organic matter fractions in acid forest floor solutions. *Org. Geochem.*, 1994, 21: 51 ~ 66
- 14 Huang Y, Eglinton G, van der Hage ERE, Boon JJ, Bol R, Ineson P. Dissolved organic matter and its parent organic matter in grass upland soil horizons studied by analytical pyrolysis techniques. *Eur. J. Soil. Sci.*, 1998, 49: 1 ~ 15
- 15 Herbert BE, Bertsch PM. Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: A review. In: Kelly JM, McFee WW. eds. *Carbon forms and functions in forest soils*. SSSA, Madison, Wisconsin, 1995, 63 ~ 88
- 16 Leenheer JA, Huffman JR. Classification of organic solutes

- in water by using macroparticulate resins. J. Res. US. Geol. Survey, 1976, 4(6): 737 ~ 751
- 17 Vance FG, David BM. Forest soil response to acid and salt additions of sulfate: III. Solubilization and composition of dissolved organic carbon. Soil Sci., 1991, 151(4): 297 ~ 305
- 18 Marschner B, Bredow A. Temperature effects on release and ecologically relevant properties of dissolved organic carbon in sterilized and biologically active soil samples. Soil Biol. Biochem., 2002, 34: 459 ~ 466
- 19 Servais P, Billen G, Hascoet MC. Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters. Water Res., 1987, 21: 445 ~ 450
- 20 Gregorich EG, Liang BC, Drury CF, Mackenzie AF, McGill WB. Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils. Soil Biol. Biochem., 2000, 32: 581 ~ 587
- 21 Hagedorn F, Blaser P, Siegwolf R. Elevated atmospheric CO₂ and increased N deposition effects on dissolved organic carbon—Clues from $\delta^{13}\text{C}$ signature. Soil Biol. Biochem., 2002, 34: 355 ~ 366
- 22 Tipping E, Woof C, Rigg E, Harrison AF, Inneson P, Taylor K, Harkness D. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. Environ. Int., 1999, 25: 83 ~ 95
- 23 Haynes RJ. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. Soil Biol. Biochem., 2000, 32: 211 ~ 219
- 24 张甲坤, 陶澍, 曹军. 中国东部土壤水溶性有机物含量与地域分异. 土壤学报, 2001, 38 (3): 308 ~ 314
- 25 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究. 植物营养与肥料学报, 2001, 7: 56 ~ 63
- 26 Corre MD, Schnabel RR, Shaffer JA. Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season and warm-season grasses in the northeastern US. Soil Biol. Biochem., 1999, 31: 1531 ~ 1539
- 27 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
- 28 Lundquist EJ, Jackson LE, Scow KM. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. Soil Biol. Biochem., 1999, 31: 1031 ~ 1038
- 29 Schaumann GE, Siewert C, Marschner B. Kinetics of the release of dissolved organic matter (DOM) from air-dried and pre-moistened soil material. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2000, 163: 1 ~ 5
- 30 Tyler U, Falkengren-Grerup G. The importance of soil acidity, moisture, exchangeable cation pools and organic matter solubility to the cation composition of beech forest (*Fagus sylvatica* L.) soil solution. J. Plant Nutr. Soil Sci., 1993, 156: 365 ~ 370
- 31 Christ MJ, David MB. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic in a spodosol. Soil Biol. Biochem., 1996, 28: 1191 ~ 1199
- 32 Guggenberger G, Zech W. Composition and dynamics of dissolved organic carbohydrates and lignin-degradation products in two coniferous forests, N. E. Bavaria Germany. Soil Biol. Biochem., 1994, 26: 19 ~ 27
- 33 Homann PS, Grigal DF. Molecular weight distribution of soluble organics from laboratory-manipulated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1305 ~ 1310
- 34 Kalbitz K, Knappe S. Influence of soil properties on the release of dissolved organic matter (DOM) from the topsoil. J. Plant Nutr. Soil Sci., 1997, 160: 475 ~ 483
- 35 Vance FG, David MB. Dissolved organic carbon and sulfate sorption by spodosol mineral horizons. Soil Sci., 1992, 154: 136 ~ 144
- 36 Jardine PM, Weber NL, McCarthy JF. Mechanisms of Dissolved organic carbon adsorption on soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53: 1378 ~ 1385
- 37 Gu B, Schmitt J, Chen Z, Liang L, McCarthy JF. Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: Mechanisms and models. Environ. Sci. Technol., 1994, 28: 38 ~ 46
- 38 Mayer LM. Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments. Chem. Geol., 1994, 114: 347 ~ 363
- 39 Mayer LM. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments. Geochim. Cosmochim. Acta 1994, 58: 1271 ~ 1284
- 40 Wander MM, Traina SJ, Peters SE. Organic and conventional management effects on biologically active organic matter pools. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1130 ~ 1139
- 41 Tipping E, Woof C. Humic substances in acid organic soils: Modeling their release to the soil solution in terms of humic charge. J. Soil Sci., 1990, 41: 573 ~ 586

- 42 Tipping E, Hurley MA. A model of solid-solution interactions in acid organic soils based on the complexation properties of humic substances. *J. Soil Sci.*, 1988, 39: 505 ~ 519
- 43 David MB, Vance GF, Rissing JF, Stevenson FJ. Organic carbon fractions in extracts of O and B horizons from a New England spodosol: Effect of acid treatment. *J. Environ. Qual.*, 1989, 18: 212 ~ 217
- 44 Vance GF, David MB. Effect of acid treatment on the leachate chemistry of a New England spodosol: Importance of the B horizon on dissolved organic carbon retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 1242 ~ 1247
- 45 Guggenberger G, Glaser B, Zech W. Heavy metal binding by hydrophobic and hydrophilic dissolved organic carbon fractions in a spodosol A and B horizon. *Water Air Soil Pollut.*, 1994, 72: 111 ~ 127
- 46 Cronan CS. Comparative effects of precipitation acidity on three forest soils: Carbon cycling responses. *Plant and Soil*, 1985, 88: 101 ~ 112
- 47 Tipping E, Woof C. The distribution of humic substances between the solid and aqueous phases of acid organic soils: A description based on heterogeneity and charge-dependent sorption equilibria. *J. Soil Sci.*, 1991, 42: 437 ~ 448
- 48 McDowell WH, Wood T. Soil processes control dissolved organic carbon concentration in stream water. *Soil Sci.*, 1984, 137: 23 ~ 32
- 49 Mulder J, van den Burg D, Temminghoff EJM. Depodzolization due to acid rain: Does aluminium decomplexation affects the solubility of humic substances? In: Senesi N, Miano TM. eds. *Humic Substances in the Global Environment and Implications on Human Health*. Amsterdam: Elsevier, 1992, 1163 ~ 1168
- 50 Römkens PFAM, Dolfing J. Effect of Ca on the solubility and molecular size distribution of DOC and Cu binding in soil solution samples. *Environ. Sci. Technol.*, 1998, 32: 363 ~ 369
- 51 Reemtsma T, Bredow A, Gehring M. The nature and kinetics of organic matter release from soil by salt solutions. *Eur. J. Soil Sci.*, 1999, 50: 53 ~ 64
- 52 Kaiser K, Zech W. Soil dissolved organic matter sorption as influenced by organic and sesquioxide coatings and sorbed sulfate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 129 ~ 136
- 53 Liechty HO, Kuuseoks E, Mroz GD. Dissolved organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24: 927 ~ 933
- 54 Chittleborough DJ, Smettem KRJ, Cotsaris E, Leaney FW. Seasonal changes in pathways of dissolved organic carbon through a hillslope soil (xeralf) with contrasting texture. *Aust. J. Soil Res.*, 1992, 30: 465 ~ 476
- 55 Federer P, Sticher H. Composition and speciation of soil solution collected in a heavy metal polluted calcareous soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 1994, 157: 131 ~ 138
- 56 Cronan CS, Aiken GR. Chemistry and transport of soluble humic substances in forested watersheds of the Adirondack Park New York. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1985, 49: 1697 ~ 1705
- 57 Andersson S, Nilsson SI, Saetre P. Leaching of dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen in mor humus as affected by temperature and pH. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 1 ~ 10
- 58 Vance GF, David MB. Chemical characteristics and acidity of soluble organic substances from northern hardwood forest floor, central Maine U.S.A. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, 55: 3611 ~ 3625
- 59 Dosskey MG, Bertsch PM. Transport of dissolved organic matter through a sandy forest soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 920 ~ 927
- 60 Evans CD, Davis TD, Wigington PJ, Tranter M, Kretser WA. Use of factor analysis to investigate processes controlling the chemical composition of four streams in the Adirondack Mountains, New York. *J. Hydrol.*, 1996, 185: 297 ~ 316
- 61 Delprat L, Chassin P, Lineres M, Jambert C. Characterization of dissolved organic carbon in cleared forest soils converted to maize cultivation. *Eur. J. Agron.*, 1997, 7: 201 ~ 210
- 62 Kreutzer K. Effects of liming on soil processes. *Plant and Soil*, 1995, 168/169: 447 ~ 470
- 63 Andersson S, Valeur I, Nilsson I. Influence of lime on soil respiration, leaching of DOC, and C/N relationships in the mor humus of a haplic podsol. *Environ. Int.*, 1994, 20: 81 ~ 88
- 64 Cronan CS, Lakshman S, Patterson HH. Effects of disturbance and soil amendments on dissolved organic carbon and organic acidity in red pine forest floors. *J. Environ. Qual.*, 1992, 21: 457 ~ 463
- 65 Simard RR, Evans LJ, Bates TE. The effects of additions of

- CaCO₃ and P on the soil solution chemistry of a podzolic soil. *Can. J. Soil Sci.*, 1988, 68: 41 ~ 52
- 66 Zsolnay A, Görlitz H. Water extractable organic matter in arable soils: Effects of drought and long-term fertilization. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, 26: 1257 ~ 1261
- 67 Rochette P, Gregorich EG. Dynamics of soil microbial biomass C, Soluble organic C and CO₂ evolution after three years of manure application. *Can. J. Soil. Sci.*, 1998, 78: 283 ~ 290
- 68 Gregorich EG, Rochette P, McGuire S, Liang BC, Lessard R. Soluble organic carbon and carbon dioxide fluxes in maize fields receiving spring-applied manure. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27: 209 ~ 214
- 69 Block JC, Mathieu L, Servais P, Fontvieille D, Werner P. Indigenous bacterial inocula for measuring the biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) in water. *Water Res.*, 1992, 26: 481 ~ 486
- 70 Qualls RG, Haines BL. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution and stream waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 578 ~ 586
- 71 Boyer JN, Groffman PM. Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, 28: 783 ~ 790
- 72 Meyer JT, Edwards RT, Risley R. Bacterial growth on dissolved organic carbon from a blackwater river. *Microb. Ecol.*, 1987, 13: 13 ~ 29
- 73 Wagai R, Sollins P. Biodegradation and regeneration of water-soluble carbon in a forest soil: leaching column study. *Biol. Fertil. Soils*, 2002, 35: 18 ~ 26
- 74 Jandl R, Sollins P. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 25: 196 ~ 201
- 75 Boissier JM, Fontvieille D. Bioavailability dissolved organic carbon in seepage waters from two forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, 25: 1257 ~ 1261
- 76 Yano Y, McDowell WH, Aber JD. Biodegradable dissolved organic carbon in forest soil solution and effects of chronic nitrogen deposition. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 1743 ~ 1751
- 77 Jandl R, Sletten RS. Mineralization of forest soil carbon: interactions with metals. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 1999, 162: 623 ~ 629
- 78 Volk CJ, Volk CB, Kaplan LA. Chemical composition of biodegradable dissolved organic matter in streamwater. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 39 ~ 44
- 79 Amon RMW, Fitznar HP, Benner R. Linkages among the bioreactivity, chemical composition, and diagenetic state of marine dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46: 287 ~ 297
- 80 Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, Matzner E. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma*, 2003, 113: 273 ~ 291

ADVANCES IN RESEARCH ON CONCENTRATION AND TRANSFORMATION OF DISSOLVED ORGANIC MATTER IN SOILS

JIAO Kun^{1,2} LI Zhong-pei¹

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

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract Dissolved organic matter is an important component of soil organic matter (SOM) and plays a more significant role in the cycling of soil organic carbon than the proportion it accounts for in total SOM because of its high biodegradability. Based on the literature, this paper reviewed recent advances in sources, composition, dynamic concentration and transformation of dissolved organic matter in soils, and proposed emphases for the study in future.

Key words Soil, Dissolved organic matter, Dynamics, Transformation, Advances