第 40 卷 第 5 期
2003 年 9 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 40, No. 5
Sep., 2003

# 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究*

倪进治[1,2] 徐建民[1,†] 谢正苗[1] 王德建[3]

(1 浙江大学土水资源与环境研究所, 杭州 310029) (2 中国科技大学地球与空间科学学院, 合肥 230026)
(3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 长期不同施肥处理下, 土壤水溶性有机碳(WSOC) 含量范围为 32.1~ 45.5 mg kg$^{-1}$, 大小顺序为 NPK+ 4 500 kg 稻草> NPK+ 2 250 kg 稻草> 对照> NPK; WSOC 占土壤总有机碳(TOC) 百分比的范围为 0.15%~ 0.19%, 大小顺序为 NPK+ 4 500 kg 稻草≈ 对照> NPK+ 2 250 kg 稻草> NPK。土壤中 WSOC 的含量与 TOC、微生物生物量碳(SMBC) 的含量都呈显著性正相关。$^{13}$C 核磁共振($^{13}$C-NMR) 的研究结果表明, WSOC 都主要是由碳水化合物 C、羧基 C 和长链脂肪 C 组成。不同施肥处理下, WSOC 和 SMBC 占 TOC 百分比的变异系数(CV) 都小于它们在土壤中绝对含量的变异系数, 且 WSOC/TOC 的变异系数大于 SMBC/TOC。WSOC/TOC 是反映不同施肥处理下土壤有机质质量的一个较好指标。

关键词 施肥, 水溶性有机碳, $^{13}$C-NMR, 结构特征, 有机质质量
中图分类号 S153.6

随着对持续性农业和土壤质量的日益重视, 了解不同施肥处理对土壤有机质质量的影响就显得很重要。尽管土壤有机质的含量变化很慢, 但土壤中一些生物活性有机质组分如水溶性有机碳(WSOC)、微生物生物量碳(SMBC) 等对不同管理处理的变化较敏感, 因而常被用来作为反映土壤有机质质量的灵敏指标。SMBC 的周转较快, 它可以在土壤总有机碳明显变化之前反映出来[1]。土壤中 WSOC 的含量很少, 一般不超过 200 mg kg$^{-1}$[2], 但它却是微生物能够快速利用的碳源[3]。对 WSOC 已有的研究主要集中于森林土壤[4~6], 农业土壤的研究较少。然而, 农业土壤中 WSOC 含量的变化及其结构特征的研究对了解土壤有机质质量以及土壤养分循环方面有着重要的作用[7,8]。因此, 本文研究了长期不同施肥处理下土壤中 WSOC 和 SMBC 等生物活性有机质组分的含量以及 WSOC 的组成特征, 试图通过土壤中活性有机组分的变化表征土壤有机质质量的演变, 为农业土壤合理培肥及其持续发展提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤采自中国科学院常熟生态实验站的长期定位试验点, 生态实验站位于北亚热带向南温带过渡区, 年日照数为 2 202.9 h, 年太阳辐射总量为 494 kJ cm$^{-2}$, 年降雨量为 1 000~ 1 100mm。夏季炎热多雨, 冬季寒冷且相对湿度较低[9]。土壤为泻湖相淀积物发育的乌栅土, 粒级组成为: > 0.02 mm 为 16.25%; 0.02~ 0.002 mm 为 49.9%; < 0.002 mm 为 33.85%。所有土壤均为 0~ 15 cm 耕层土壤, 不同处理小区采集 5 个点的混合土样, 当天运回实验室, 捡去作物残根和小石头, 过 2 mm 筛, 然后将土样分为两部分, 一部分风干用于测定土壤理化性质, 另一部分保存在 4 ℃冰箱中, 用于水溶性有机碳和微生物生物量的测定(3 天内完成)。土壤基本性质见表 1。

* 国家重点基础研究发展规划项目 (批准号: G1999011809)、高等学校骨干教师资助计划和浙江省自然科学基金 (批准号: RC99032) 资助

† 通讯作者, E-mail: jxu@mail.hz.zj.cn

收稿日期: 2002-03-13; 收到修改稿日期: 2002-09-18

表 1　不同施肥处理下土壤理化性质

**Table 1**　Selected properties of soils under different fertilization treatments

| 处理 Treatment | 总有机碳 TOC (g kg$^{-1}$) | 全氮 TN (g kg$^{-1}$) | pH (Soil: $H_2O$ = 1: 2.5) | 微生物生物量碳 SMBC (mg kg$^{-1}$) | SMBC/TOC (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 19.8 (±0.53) C | 2.23 (±0.05) B | 7.69 (±0.07) A | 654.1 (±14.6) C | 3.30 (±0.12) B |
| NPK | 21.2 (±0.40) B | 2.38 (±0.04) AB | 7.39 (±0.25) AB | 731.1 (±55.8) B | 3.45 (±0.22) AB |
| NPK+ 2 250 kg 稻草 | 23.0 (±1.29) A | 2.57 (±0.13) A | 7.31 (±0.06) B | 862.8 (±12.5) A | 3.76 (±0.21) A |
| NPK+ 4 500 kg 稻草 | 23.7 (±0.26) A | 2.45 (±0.32) AB | 7.19 (±0.20) B | 886.7 (±27.2) A | 3.74 (±0.15) A |

注: 具有相同字母的表示差异不显著($p < 0.05$); 括号内的数据为标准偏差

### 1.2　实验设计

试验建立于 1990 年 10 月, 采用田间微区随机区组法, 小区面积为 5× 4= 20m$^2$, 小区之间用水泥板隔离。共设四个不同施肥处理(三个重复): (1) 对照(CK); (2) 氮磷钾(NPK); (3) 氮磷钾+ 稻草 2 250 kg hm$^{-2}$ (NPK+ 2 250 kg 稻草); (4) 氮磷钾+ 稻草 4 500 kg hm$^{-2}$ (NPK+ 4 500 kg 稻草)。N、P 和 K 的用量分别为 120、75 和 150 kg hm$^{-2}$, 肥料的品种为尿素(46.2%)、过磷酸钙(22%) 和氯化钾(63.5%)。磷肥和钾肥作基肥一次性施入, 尿素 2/3 用作基肥, 1/3 用作分蘖期追肥。小区的耕作制度为小麦和水稻的一年两熟轮作制。稻草还田时间为 10 月份, 先将稻草秸秆粉碎成 0.5 cm 大小, 然后施于土壤。采样时间为 2000 年 5 月, 小麦正处于收割期。

### 1.3　测定方法

土壤理化性质采用常规分析方法测定[10]。土壤微生物生物量碳的测定采用氯仿熏蒸—$K_2SO_4$ 提取法[11], 提取液中的有机碳采用日本 Shimazu 总有机碳自动分析仪(TOC-500) 测定[12], 微生物生物量碳的转换系数 $K_{EC}$ 取 0.45。水溶性有机碳的测定方法为: 称取 25 g 新鲜土样, 加入 50 ml 蒸馏水, 于室温下振荡 30 min, 4 500 r min$^{-1}$ 离心 10 min, 上清液过 0.45 μm 的滤膜, 滤液中的有机碳用 TOC-500 测定[13]。水溶性有机碳的 $^{13}$C-核磁共振研究步骤如下: 称取 200 g 鲜土, 加入 300 ml 蒸馏水, 于室温下振荡充分提取, 离心取上清液, 上清液过 0.45 μm 微孔滤膜, 每个重复土样的提取液混合到一起, 冷冻干燥。冷冻干燥后的样品用来做固体交叉极化魔角自旋 $^{13}$C-核磁共振(CP/MAS $^{13}$C-NMR)。CP/MAS $^{13}$C-NMR 的仪器型号为 AVANCE DSX-300(德国 Bruker 公司生产), 测试条件如下: 射频场强度 79 kHz, $^{13}$C 共振频率 75.65 MHz, 采样数据点 4 000 个, 转子转速 4 500 Hz, 谱宽 399 δ。

### 1.4　$^{13}$C 核磁共振图谱和数据分析

水溶性有机碳的 $^{13}$C 核磁共振图谱, 根据官能团种类可分成 6 个化学位移区间[14, 15]: 0~ 40 δ(长链脂肪-C, 包括脂肪酸、脂类物质、蜡、树脂和烷烃), 40~ 60 δ(甲氧基-C 和蛋白质-C), 60~ 110 δ(碳水化合物-C 和被羟基取代的脂肪族化合物-C), 110~ 150 δ(芳香-C), 150~ 160 δ(酚-C, 也就是被吸电子基团如-OH、-$NH_2$ 取代的芳香碳), 160~ 190 δ(羧基-C)。芳香度为芳香-C(110~ 160 δ) 与脂肪-C+ 芳香-C(0~ 160 δ) 的百分比。本文实验数据统计分析采用 SAS 软件(6.12 版本)。

## 2　结果与讨论

### 2.1　土壤理化性质的变化

如表 1 知, 经过 10 年的不同施肥处理后, 有机—无机配施的土壤总有机碳(TOC) 和 SMBC 的含量都明显高于单施 NPK 和 CK 土壤, 这是由于有机—无机配施增加了土壤中有机质的输入, 所以土壤中有机碳含量有明显的增加[16]。土壤中有了充足的碳源, 微生物就能够长期保持活跃状态, SMBC 含量也就较高[17]。不同施肥处理下, 土壤全氮(TN) 含量除 NPK+ 2 250 kg 稻草与 CK 处理间有显著差异外, 其它处理之间的差异都不显著。Liang 等[13] 的研究表明, 随着氮肥施入量的增加, 土壤微生物生物量碳的含量呈下降趋势, 同时微生物的活性也下降。而施用有机肥料或植物残体, 能同时满足微生物对碳和氮的需求, 所以它们都能在很大程度上激发微生物的活性, 增加微生物的生物量。NPK 处理的土壤, TOC 和 SMBC 的含量都显著高于 CK 处理土壤, 这是因为无机肥增加了作物产量, 归还土壤的作物残体量也增

多,从而增加了土壤中微生物可利用的碳源[9, 18]。有机—无机配施的土壤 pH 值明显小于 CK 处理的土壤,NPK 处理的土壤 pH 值也小于 CK 处理的土壤,但差异不显著,这表明了增施有机肥比单施无机肥更能够使土壤趋向于中性。

## 2.2 水溶性有机碳含量

由表 2 知,NPK+ 4 500 kg 稻草处理的土壤中 WSOC 含量及其占TOC 的百分含量都最高,NPK 处理的土壤中WSOC 含量及其占 TOC 的百分含量都最低。与 CK 处理土壤相比较,NPK 处理的土壤中 WSOC 含量下降了 15.3%,NPK+ 2 250 kg 稻草和 NPK+ 4 500 kg 稻草处理的土壤中 WSOC 含量分别增加了 2.4% 和 20.2%。有机—无机配施能够增加土壤WSOC 的含量,主要是因为加入的有机质在腐解过程中能够释放大量水溶性有机碳的缘故;NPK 处理的土壤中 WSOC 的含量较低,可能与氮肥的施入有关,氮肥施用量的增加,通常会导致土壤中 WSOC 含量的减少[7,13]。

表 2 不同处理下水溶性有机碳含量及其占土壤总有机碳的百分比

**Table 2** Contents of WSOC and its percentages in TOC under different fertilization treatments

| 处理 Treatments | WSOC ($mg\ kg^{-1}$) | WSOC/TOC (%) |
|---|---|---|
| CK | 37.9 (±1.5) B | 0.19 (±0.01) A |
| NPK | 32.1 (±1.6) C | 0.15 (±0.01) C |
| NPK+ 2 250 kg 稻草 | 38.8 (±3.9) B | 0.17 (±0.01) B |
| NPK+ 4 500 kg 稻草 | 45.5 (±0.9) A | 0.19 (±0.00) A |

注:具有相同字母的表示差异不显著($p < 0.05$);括号内的数据为标准偏差

表 3 不同施肥处理下土壤性质间的相关性

**Table 3** Correlation between soil properties under different fertilization treatments

| 相关系数 Coefficient | TOC | TN | pH | SMBC | WSOC |
|---|---|---|---|---|---|
| TOC | 1.000 0 | | | | |
| TN | 0.586 3* | 1.000 0 | | | |
| pH | −0.710 6** | −0.665 4* | 1.000 0 | | |
| SMBC | 0.906 0** | 0.636 8* | −0.853 9** | 1.000 0 | |
| WSOC | 0.644 6* | 0.184 5 | −0.347 7 | 0.597 0* | 1.000 0 |

注:$n$(样本数) = 12,* 和** 分别表示显著性水平为 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$

对WSOC、SMBC 以及土壤理化性质间进行的相关性分析表明,WSOC 和 SMBC 都与TOC 呈显著性正相关(表 3)。WSOC 与 SMBC 之间也呈显著性正相关,主要因为 WSOC 不仅是微生物的碳源,而且它的产生也被认为是微生物参与的结果[19],如微生物的代谢物(如多糖粘液)对水溶性有机碳库就有显著的贡献[20, 21]。

## 2.3 水溶性有机碳的组成特征

图 1 是不同施肥处理下土壤水溶性有机碳的$^{13}C$ 核磁共振图谱。由图谱可知,不同施肥处理下水溶性有机碳都有几个相似的特征峰:20 δ 和 30 δ 附近有两个不同烷基-C 峰,其中 20 δ 左右处是烷基链上终端甲基 C 的特征峰,30 δ 左右处是长烷基链中$(CH_2)_n$-C 的峰。70 δ 和 100 δ 附近是不同碳水化合物-C 的峰,167 δ 附近是羧基-C 的峰。

依据图谱的实际形状,对不同化学位移区间的所有峰进行了积分,根据积分面积可计算出不同类型 C 占总的 WSOC 的相对百分含量(表 4)。积分区间的划分只是近似的,因为有些类型的C 会同时落在人

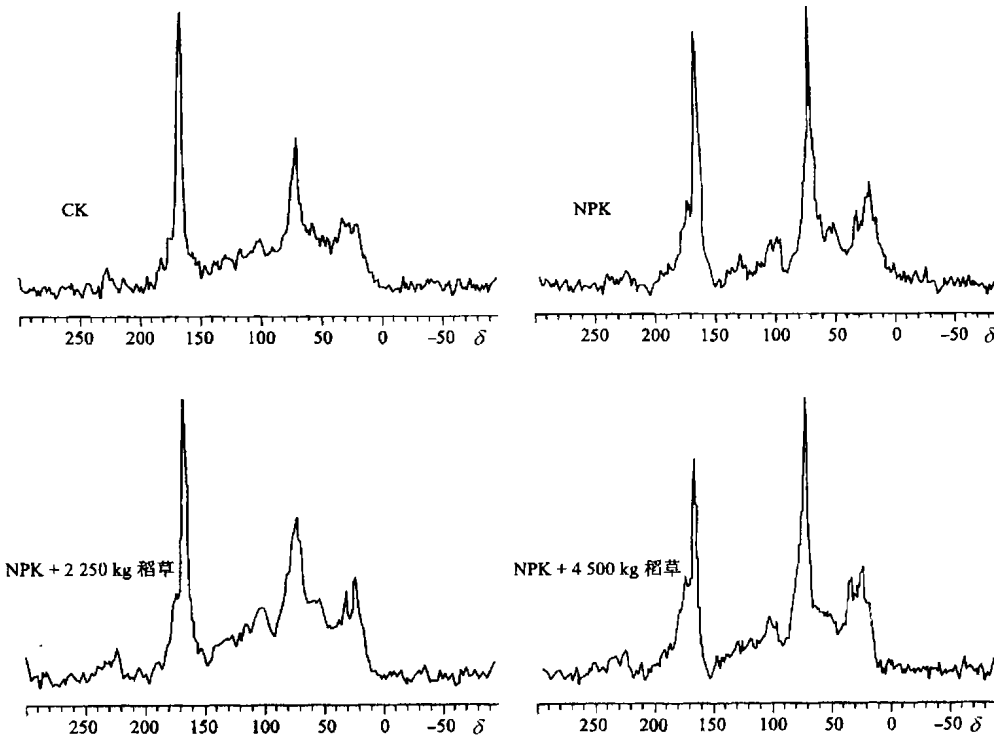


图 1　不同施肥处理下土壤水溶性有机碳的$^{13}$C-NMR 图谱

Fig. 1　$^{13}$C-NMR spectrum of WSOC under different fertilization treatments

为分的两个区间内。

表 4　不同施肥处理下土壤水溶性有机碳的化学组成

**Table 4**　Chemical composition of WSOC under different treatments

| 施肥处理 Treatment | 长链脂肪 Long-chain aliphatic 0~40 | 化学位移(δ) 蛋白质 Protein 40~60 | 碳水化合物 Carbohydrate 60~110 | 芳香碳 Aromatic 110~150 | 酚 Phenolic 150~160 | 羧基碳 Carboxylic 160~190 | 芳香度 (110~160)δ/(0~160)δ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 不同碳的相对百分比 Relative C distribution (%) | | | | | | |
| CK | 18.6 | 10.6 | 32.4 | 11.7 | 3.6 | 23.1 | 19.9 |
| NPK | 22.0 | 9.2 | 36.0 | 6.3 | 1.4 | 25.1 | 10.3 |
| NPK+ 2 250 kg 稻草 | 16.0 | 13.2 | 33.5 | 12.3 | 2.9 | 22.1 | 19.5 |
| NPK+ 4 500 kg 稻草 | 21.7 | 13.0 | 32.9 | 7.8 | 1.2 | 23.4 | 11.7 |

由表 4 知, 不同施肥处理下的 WSOC 都主要是碳水化合物 C 以及羧基 C 和长链脂肪 C 组成。不同施肥处理下 WSOC 中碳水化合物 C 的相对百分含量都最高, 约为 WSOC 总量的 1/3; 其次是羧基 C 和长链脂肪 C; 酚 C 占 WSOC 的百分含量最低, 都小于 4%。NPK 处理的土壤 WSOC 中的碳水化合物 C 含量最高, 最容易被微生物分解利用, 所以这种施肥处理下土壤 WSOC 的含量最低(见表 2)。不同施肥处理下, 土壤 WSOC 的芳香度的范围为 10.3%~19.9%。Liang 等[13] 的研究表明, 不同肥料处理下土壤 WSOC

主要是由碳水化合物、长链脂肪族化合物和蛋白质组成, 芳香度的范围为 5.8% ~ 21.8% , 这与我们的结果基本一致, 但羧基 C 和蛋白质含量有所不同, 可能是使用的肥料种类不一样的缘故。其它的研究表明, 土壤中腐植酸的芳香度范围为 35% ~ 92%, 其中富啡酸的芳香度要小于胡敏酸[22~24]。因此, WSOC 的芳香度明显低于富啡酸和胡敏酸, 表明了WSOC 中的芳香碳含量较少; 而芳香化合物的生物有效性较低, 故 WSOC 比胡敏酸和富里酸更具有生物活性。

**2.4** 水溶性有机碳作为表征土壤有机质质量的指标

土壤中生物活性有机碳占总有机碳的百分比可以用来反映土壤有机质的质量, 活性有机碳所占的百分比越大, 表示有机质越易被微生物分解, 质量也就越高。SMBC 及其占土壤TOC 的百分比被认为是监测土壤有机质动态变化很有用的一个指标[25,26], 且相对百分含量在反映土壤有机质的质量上要比绝对含量好, 因为它可以消除不同土壤中有机质含量的差别。

变异系数(CV)通常用来反映数据之间的离散程度。由表 5 知, 不同施肥处理下 WSOC 的变异系数最大, 其次是 SMBC。TOC、TN 和 pH 的变异系数都比 WSOC 和 SMBC 的变异系数小, 因此不同施肥处理对WSOC 和 SMBC 的影响明显大于 TOC、TN 和 pH, 这也就说明了 WSOC 和 SMBC 对不同施肥处理更敏感。不同施肥处理下WSOC 和 SMBC 占 TOC 百分比的变异系数都要小于它们在土壤中绝对含量的变异系数, 且 WSOC/TOC 的变异系数大于 SMBC/TOC。综合以上分析, 可以认为水溶性有机碳占土壤总有机碳的百分比是反映不同施肥处理对土壤有机质质量影响的一个较好指标。

表 **5** 不同施肥处理下土壤性质的变异系数

**Table 5** CV of soil properties under different fertilization treatments(%)

| TOC | TN | pH | SMBC (SMBC/TOC) | WSOC (WSOC/TOC) |
|---|---|---|---|---|
| 8.00 | 5.90 | 2.88 | 14.06 (6.32) | 14.27 (10.94) |

## 3 小 结

水溶性有机碳主要是由碳水化合物 C、羧基 C 和长链脂肪 C 组成。不同施肥处理下, 水溶性有机碳的含量和组成以及微生物生物量碳的含量差异主要与肥料的种类和数量有关。有机—无机配施的土壤中有机碳、微生物生物量碳和水溶性有机碳的含量都高于单施无机肥和对照土壤。水溶性有机碳和微生物生物量碳的含量都与土壤总有机碳含量显著性正相关, 且它们之间也呈显著性正相关。不同施肥处理下 WSOC/TOC 的变异系数大于 SMBC/TOC 的变异系数, 表明 WSOC/TOC 对不同施肥处理较敏感, 可以作为反映不同施肥处理对土壤有机质质量影响的较好指标。

## 参考文献


1. Powlson D S. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. Soil Biol. Biochem., 1987, 19: 159~ 164
2. Burford J R, Bremner J M. Relationships between denitrification capacities of soils and total water soluble and readily decomposable soil organic matter. Soil Biol. Biochem., 1975, 7: 389~ 394
3. McGill W B, Cannon K R, Robertson J A, *et al*. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Berton L after 50 years of cropping to two rotations. Can. J. Soil Sci., 1986, 66: 1~ 19
4. Davidson E A, Galloway L F, Strand M K. Assessing available carbon: comparison of techniques across selected forest soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1987, 18: 45~ 64
5. Dalva M, Moore T R. Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swamp catchment. Biogeochemistry, 1992, 15: 1~ 9
6. Dosskey M G, Bertsch P M. Transport of dissolved organic matter through a sandy forest soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61: 920~ 927
7. Chantigny M H, Angers D A, Prevost D, *et al*. Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization. Soil Biol. Biochem., 1999, 31: 543~ 550
8. Magill A H, Aber J D. Variation in soil net mineralization rates with dissolved organic carbon additions. Soil Biol. Biochem.,

2000, 32: 597~ 601

9. 曹志洪, 朱永官, 廖海秋, 等. 苏南稻麦两熟制下土壤养分平衡与培肥的长期实验. 土壤, 1995, 27: 60~ 64
10. 南京农业大学主编. 土壤农化分析(第二版). 北京: 农业出版社, 1992
11. Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass. Soil Biol. Biochem., 1987, 19: 703~ 707
12. Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al*. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automatic procedure. Soil Biol. Biochem., 1990, 22: 1 167~ 1 169
13. Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, *et al*. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. Biol. Fertil. Soils, 1998, 26: 88~ 94
14. Baldock J A, Oades J M, Vassallo A M, *et al*. Solid state CP/MAS $^{13}$C NMR analysis of particles size and density fractions of a soil incubated with uniformly labelled $^{13}$C-glucose. Aust. J. Soil Res., 1990, 28: 193~ 212
15. Schnitzer M, Perston C M. Analysis of humic acids by solution and solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 326~ 331
16. Witter E, Kanal A. Characteristics of the soil microbial biomass in soils from a long-term field experiment with different levels of C input. Applied Soil Ecology, 1998, 10: 37~ 49
17. Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. Soil Biol. Biochem., 1989, 21: 471~ 479
18. Coote D R, Ramsey J F. Quantification of the effects of over 35 years of intensive cultivation of four soils. Can. J. Soil Sci., 1986, 63: 1~ 4
19. Christ M J, David M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol. Soil Biol. Biochem., 1996, 28: 1 191~ 1 199
20. Cook B D, Allan D L. Dissolved organic carbon in old field soils: Compositional changes during the biodegradation of soil organic matter. Soil Biol. Biochem., 1992, 24: 595~ 600
21. Qualls R G, Haines B L. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 578~ 586
22. Hatcher P G, Schnitzer M, Dennis L W, *et al*. Aromaticity of humic substances in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45: 1 089~ 1 094
23. Schnitzer M, Preston C M. Analysis of humic acids by solution and solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 326~ 331
24. Mahieu N, Powlson D S, Randall E W. Statistical analysis of published carbon-13 CPMAS NMR spectra of soil organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 307~ 319
25. Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. Aust. J. Soil Res., 1992, 30: 195~ 207
26. Powlson D C, Brookes P C, Christensen T C. Measurement of soil microbial biomass provides as an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. Soil Biol. Biochem., 1987, 19: 159~ 164

# CONTENTS OF WSOC AND CHARACTERISTICS OF ITS COMPOSITION UNDER DIFFERENT FERTILIZATION SYSTEMS

Ni Jin-zhi[1,2] Xu Jian-min[1] Xie Zheng-miao[1] Wang De-jian[3]

(1 *Dept. of Resource Sciences, Zhejiang University, Hongzhou* 310029, *China*)

(2 *Dept. of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*)

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

**Summary**

Under a long-term experiment on different fertilization treatments, the contents of water-soluble organic carbon (WSOC) in the soil ranged from 32.1 to 45.5 mg $kg^{-1}$, following the order of NPK+ 4 500 kg rice straw> NPK+ 2 250 kg rice straw> CK> NPK. The percentages of WSOC to total soil organic carbon (TOC) ranged from 0.15% to 0.19%, following the order of NPK+ 4 500 kg rice straw ≈CK> NPK+ 2 250 kg rice straw> NPK. The contents of WSOC had significantly positive correlations with both TOC and soil microbial biomass carbon(SMBC). $^{13}$C-NMR results showed that WSOC were mainly composed of carbohydrates carbon, carboxyl carbon and long-chain aliphatic carbon. Under different fertilization treatments, the coefficients of variation (CV) of WSOC/TOC and SMBC/TOC were lower than those of their absolute contents in soil. Furthermore, the CV of WSOC/TOC was higher than that of SMBC/TOC. The percentage of WSOC to TOC was a good indicator of the quality of soil organic matter under different fertilization treatments.

**Key words** Fertilization, Water-soluble organic carbon, $^{13}$C-NMR, Structure characteristics, Quality of soil organic matter