

# 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征

张文菊<sup>1, 2</sup>, 彭佩钦<sup>1</sup>, 童成立<sup>1</sup>, 王小利<sup>1, 3</sup>, 吴金水<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态重点实验室, 长沙 410125; 2. 华中农业大学资源环境学院, 武汉 430070; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要:以洞庭湖 3 类湿地的 9 个典型剖面为代表,研究了洞庭湖湿地有机碳垂直分布和组成特征.结果表明,湖草滩地表层(0~10 cm)有机碳含量(>40 g/kg)明显高于芦苇滩地(20±2.8)g/kg 和垦殖水田(28±8.6)g/kg.0~30 cm 内,湖草和芦苇滩地有机碳含量随深度的增加而下降,30 cm 以下有机碳含量基本稳定.垦殖水田的 3 个剖面间有机碳含量存在较大变异.湖草滩地表层 0~10 cm 轻组碳占总有机碳的 20%以上,而芦苇滩地和垦殖水田表层 0~10 cm 的有机碳以稳定的重组碳为主(>90%).同一类型湿地垂直方向上,受有机碳来源复杂性的影响,轻组碳占总有机碳的比例具有明显的层次性.分组试验还表明,重组碳与总有机碳、容重与总有机碳、重组碳与重组氮之间具有极显著的相关关系( $p < 0.01$ ).

关键词:湿地;有机碳;轻组;重组;垂直分布

中图分类号:S153.6 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)03-0056-05

## Characteristics of Distribution and Composition of Organic Carbon in Dongting Lake Floodplain

ZHANG Wen-ju<sup>1, 2</sup>, PENG Pei-qin<sup>1</sup>, TONG Cheng-li<sup>1</sup>, WANG Xiao-li<sup>1, 3</sup>, WU Jin-shui<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory of Subtropical Agro Ecology, Institute of Subtropical Agricultural, CAS, Changsha 410125, China; 2. College of Resource and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China; 3. College of Resource and Environment, Northwest Sci Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Distribution and composition of organic carbon (OC) at nine soil profiles of three types of wetlands in Dongting Lake floodplain were analyzed. Results show that the OC content at top layer (0~10cm) in *Carex spp* dominated floodplain was much higher (>40 g/kg) than that in *Phragmites* dominated floodplain (20±2.8)g/kg and paddy soil (28±8.6)g/kg. The OC content decreased with increasing depth from 0 to 30 cm, while it was relatively stable (around 15 g/kg) at depths deeper than 30 cm in *Carex spp* dominated and *Phragmites* dominated floodplain. However, there was a substantial variability in OC content in paddy soil profiles. In terms of the composition of OC, at top layer (0~10 cm), light fraction carbon in *Carex spp* dominated floodplain accounted for more than 20% of the total organic carbon, whereas more than 90% of total organic carbon were heavy fraction that were much more difficult to be decomposed in *Phragmites* dominated floodplain and paddy soils. The ratio of light fraction to total organic carbon at the soil profiles was greatly affected by the origin of organic matter. Statistical analyses indicate that there were significant correlations between heavy fraction and total organic carbon, between bulk density and total organic carbon, and between OC and nitrogen in heavy fraction ( $p < 0.01$ ).

**Key words:** floodplain; organic carbon; light fraction; heavy fraction; vertical distribution

湿地生态系统包括天然沼泽、河流、湖泊、浅海和滩涂以及人工湿地(稻田、水库等).随着近几十年来全球气候和环境变化的加剧,有关湿地生态系统碳循环的研究已成为全球碳循环和气候变化研究计划的重要组成部分<sup>[1, 2]</sup>.我国有关湿地碳循环的研究主要集中于青藏高原东部的若尔盖高原和东北的三江平原、大小兴安岭等有泥炭堆积的沼泽区域<sup>[3~5]</sup>.而对于东部平原地区无泥炭堆积的湖泊型湿地的碳循环研究相对薄弱.洞庭湖是我国第二大淡水湖泊,位于湖南省北部,是承纳湘江、资江、沅江、澧水 4 条主要河流,吞吐长江的洪道型湖泊.由于泥沙淤积,湖床不断淤积抬高,在周围形成了大面积的湖洲湿地,而围湖造田和退田还湖等人类活动

也给洞庭湖湿地环境造成了一定的影响.本文是以洞庭湖区的湖洲湿地和垦殖水田为研究对象,选择代表性样点,研究了该地区湿地有机碳的分布与组成特征,分析了该区湿地有机碳的分布和组成特征与湖区湿地演替及利用方式之间的关系,以及有机碳含量、容重与湿地调蓄洪水能力之间的关系,为合

收稿日期:2004-08-16;修订日期:2004-11-08

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-14);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412503);国家自然科学基金重点项目(40235057);中国科学院知识创新领域前沿项目(02200220020223)

作者简介:张文菊(1978~),女,湖北孝感人,博士研究生,主要从事土壤与环境生态方面的研究. E-mail: zhwenju@163.com

\* 通讯联系人. E-mail: js\_wu@isa.ac.cn

理地开发和利用,恢复和保护湿地,加强湿地生态环境功能提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点概况

洞庭湖区位于北纬 27° 55′ ~ 30° 23′, 东经 110° 50′ ~ 113° 45′ 之间.该区气候状况为春夏冷暖气流交替频繁,夏秋晴热少雨,秋寒偏早.年平均气温 16.5℃ ~ 17℃,一月平均气温 3.8℃ ~ 4.7℃,七月平均气温 29℃ 左右.年平均降水量 1 250 ~ 1 450 mm.洞庭湖洲滩地类型根据地势高程和演替阶段主要分为 3 种:①泥沙滩地;②湖草滩地;③芦苇滩地.枯水季节,进入湿地的水量少,水位低,芦苇和湖草滩地全部露出水面,并且有大面积的泥沙滩地露出水面.平水季节,湿地区域来水量较枯水季

节多,地势低的泥沙滩地和部分的湖草滩地被淹没,芦苇滩地仍露出水面.洪水季节,来水量大,地势低的草滩地和芦苇滩地被水淹没,有部分芦苇滩地地表有积水,但芦苇植株未被完全淹没.其中部分的湖草滩地和芦苇滩地被围垦成水田.

1.2 样品采集

根据洞庭湖湿地季节性淹水的特点,于枯水期(2004 年 3 月上旬)分别在东洞庭、南洞庭的湖洲选择代表性样点,采集了 2 个湖草滩地、4 个芦苇滩地和 3 个垦殖水田共计 9 个土壤剖面.剖面深度根据地下水位的状况而定,同一类型湿地的剖面之间相距至少 4 km.由于土壤潮湿,剖面样品的采集自上而下分层进行,每层 10 cm,在每层分别采集 3 ~ 4 个环刀样和 1 kg 左右土壤样品供室内分析测定.采样点基本情况见表 1.

表 1 洞庭湖湿地样点基本情况

Table 1 Description of the sampling sites at Dongting Lake

| 湿地类型 | 地理坐标                            | 水文状况  | 植被     | 地下水位 / cm | 土种名称 <sup>1)</sup> |
|------|---------------------------------|-------|--------|-----------|--------------------|
| 湖草滩地 | N 29° 06′ 06″<br>E 112° 42′ 50″ | 季节性淹水 | 湖草     | 100       | 荒洲紫潮泥沙土            |
|      | N 29° 02′ 15″<br>E 112° 43′ 26″ | 季节性淹水 | 湖草     | 90        | 荒洲紫潮泥土             |
| 芦苇滩地 | N 29° 05′ 49″<br>E 112° 50′ 11″ | 季节性淹水 | 芦苇     | 120       | 芦苇紫潮泥沙土            |
|      | N 29° 03′ 22″<br>E 112° 51′ 19″ | 季节性淹水 | 芦苇     | 70        | 芦苇沙底紫潮泥土           |
|      | N 28° 55′ 04″<br>E 112° 29′ 07″ | 季节性淹水 | 芦苇, 枫杨 | > 100     | 芦苇紫潮泥土             |
|      | N 29° 54′ 47″<br>E 112° 33′ 12″ | 季节性淹水 | 芦苇, 枫杨 | > 100     | 芦苇紫潮泥沙土            |
|      |                                 |       |        |           |                    |
| 垦殖水田 | N 28° 58′ 56″<br>E 112° 44′ 05″ | 间歇性淹水 | 水稻     | 80        | 紫潮泥                |
|      | N 29° 02′ 22″<br>E 112° 38′ 37″ | 间歇性淹水 | 水稻     | 100       | 紫潮泥                |
|      | N 28° 46′ 53″<br>E 112° 24′ 28″ | 间歇性淹水 | 水稻     | 90        | 潮沙泥                |
|      |                                 |       |        |           |                    |

1) 资料来源于湖南省沅江市土肥站

1.3 分析方法

土壤容重的测定采用烘干法<sup>[6]</sup>,样品有机碳、全氮含量采用元素分析仪(Vario MAX CN, Ele mentar,德国)测定.

土壤有机质轻组(比重小于 1.7)、重组(比重大于 1.7)采用改进的比重法<sup>[7]</sup>.称取 10 g 过 20 目筛风干样品于已称重的 100 mL 离心管中,加入 40 mL 比重为 1.7 的 NaI 溶液,超声波分离 10 min, 4200 r/min 下离心 10 min.将悬浮物倒入 45 cm 孔径为 0.043 mm 的铜筛中过滤收集轻组有机质.再

往离心管中加入 20 mL 左右 NaI 溶液,按同样步骤分离.离心和收集轻组有机质(重复 2 ~ 3 次).将收集的轻组有机质用 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液淋洗,再用蒸馏水淋洗至无 Cl<sup>-</sup> 反应(Ag NO<sub>3</sub> 溶液检验,白色絮状沉淀),并转移到已称重的 25 mL 烧杯中;沉积于离心管底的重组加入 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>,充分搅拌后离心 10 min,倒掉上清液后重复 5 ~ 6 次至无 I<sup>-</sup> 反应(Ag NO<sub>3</sub> 溶液检验,黄色絮状沉淀),再以蒸馏水离心 1 次,将收集轻组的小烧杯和盛装重组的离心管于 60℃ 下烘干.称重.元素分析仪测定其碳、

氮含量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机碳的垂直分布

湖草滩地表层 0~10 cm 有机碳含量较高,2 个样点均在 40 g/kg 以上(图 1 A),这可能是由于湖草地下生物量较大,地下有一大约 6~7 cm 的草根层,而且这类湿地在洞庭湖区受人类干预活动较少,每年净同化积累的生物量几乎全部投入该生态系统,有机碳的输入量较大.但该地区地处亚热带气候区,湿热的气候条件不利于有机碳的积累,有机碳的分解转化较快,表层无大量有机碳的积累,这与三江平原沼泽湿地存在明显的差别<sup>[4,5]</sup>.0~30 cm 内有机碳含量随深度的增加而降低,2 个样点相同层次有机碳含量的变异可能主要是由土壤质地和植被生产力的差异造成的.30 cm 以下,2 个样点各层次有机碳含量的变异较小,基本稳定在 14 g/kg 左右.

芦苇为多年生植物,株高 2~3 m,根系可达地下 10 m.每年冬季,芦苇场掠夺式的人工收割将绝

大部分的地上生物量移走,植物残体的投入量明显低于湖草滩地,其表层 0~10 cm 有机碳含量明显低于湖草滩地(图 1 B),为 $(20 \pm 2.8)$  g/kg.0~30 cm 内有机碳含量随深度增加而下降,但下降幅度明显低于湖草滩地.30 cm 以下,除其中一个剖面的有机碳在 30~60 cm 深度内约维持在 21 g/kg 外,其余 3 个点各层次的有机碳含量与湖草滩地基本相当.另外,尽管芦苇生产并无肥料投入,但每年丰水期洪水携带的泥沙沉积能为当季芦苇的生长提供丰富的养分,表层有机碳含量与垦殖水田无明显差异.

垦殖水田表层 0~10 cm 有机碳含量较低,约为 $(28.1 \pm 8.6)$  g/kg(图 1 C),变异较大.这主要是由于有机碳含量不仅受垦殖前湿地沉积物来源复杂性的影响,而且垦殖后施肥和耕作熟化等管理措施对其有机碳的周转也产生了重要影响.0~40 cm,有机碳含量随深度的增加而降低,40 cm 以下,同一剖面有机碳含量变化不大.但 3 个样点在同一层次有机碳含量的变异较大.这可能与水田的开垦年限、开垦前植被生长类型有关.

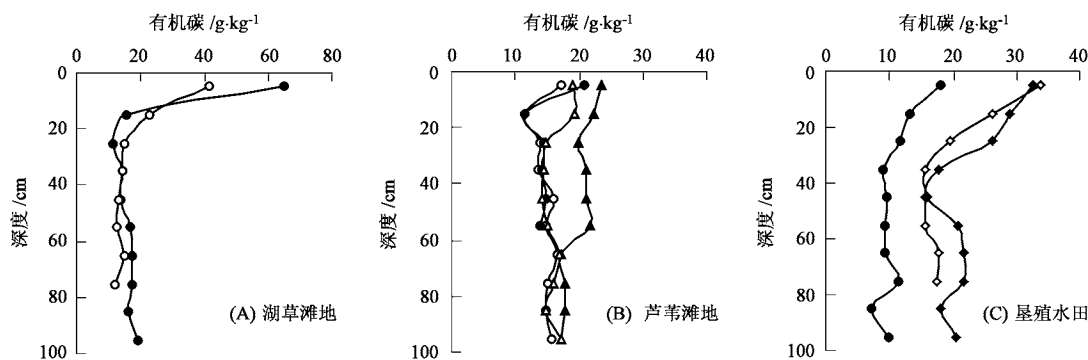


图 1 洞庭湖湿地有机碳垂直分布

Fig. 1 Distribution of organic C in Dongting Lake floodplain

泥沙淤积是湖滩湿地发育的主要驱动力,而泥沙的不均匀淤积必然引起湖洲湿地发育与演替的差异,这也是造成处于同一演替阶段湿地有机碳含量变异的主要原因之一.湖洲湿地的正向演替规律为,泥沙滩地→湖草滩地→芦苇滩地→森林湿地.由于湖草生长呈簇状,而且分布密集,更容易阻止泥沙的前进,造成泥沙淤积.湖草滩地演替为芦苇滩地的速度一般超过水面与泥沙滩地演替为湖草滩地的速度<sup>[8]</sup>,使得湖草滩地面积相对减少.前面的研究表明,湖草滩地表层有机碳含量明显高于芦苇滩地,那么这种演替以及人类生产活动的干扰就有可能造成洞庭湖湿地有机碳的大量损失.流水携带的泥沙越

多,越易加速这种正向演替,导致湖洲湿地蓄积有机碳的损失,增加湿地碳向大气的排放.因此,加强长江中上游的水土保持工作,减少流水的泥沙携带量,恢复和保护湿地对于维护和加强湿地生态功能具有重要的现实意义.

### 2.2 有机碳的组成特征

土壤有机质的轻重组是按其比重进行划分的.本研究采用的分离比重为 1.7,即比重 < 1.7 为轻组有机质,比重 > 1.7 为重组有机质.不同组分中有机碳的组成和分解特性都存在明显差异.轻组有机质由未分解彻底的植物残体及其碎片组成,还包括少量活的微生物及其分泌物等,具有易被微生物分解

和利用等特性,对气候、环境变化和农业管理措施反应相当敏感<sup>[7,9]</sup>,是土壤的活性碳库。重组有机质是由轻组有机质经彻底分解后残留的或重新合成的,以芳香族物质为主体的有机物质(主要是腐殖质),其结构稳定复杂,实际上这部分有机质是结合在土壤粘粒之间的,或在土壤团聚体形成过程之中被包在团聚体内部的有机质,对维持团聚体的结构具有非常重要的作用,是很难被微生物利用的,是土壤的稳定碳库。这 2 种组分的含量特征能从一定程度上说明该碳库对于气候和环境变化反应的敏感性。

湖草滩地表层(0~10 cm)轻组碳含量基本占总有机碳的 20%以上(表 2),明显高于一般农田土壤表层的轻组碳含量<sup>[7]</sup>。这主要是由于湖草属草本植

物,细根发达,地下生物量较高,且每年在湖草生长旺盛的 6 月中旬时,汛期来临,将湖草全部淹没,使其无法正常生长。因此,全部的地上及部分地下生物量投入该生态系统进行分解转化,但在较长时间(4~6 个月)的积水条件下,微生物对这些植物残体的分解不彻底,从而形成了一定比例的轻组碳。芦苇滩地表层(0~10 cm)轻组碳含量为 7.9%±3.1%,变异较大。垦殖水田(表层)的轻组碳含量为 8%±1.6%,这说明,湖草滩地的有机碳库对于气候和环境变化的反应较为敏感,任何的人为干预活动都易导致这部分碳的损失,而芦苇滩地和垦殖水田表层有机碳的 90%以上为稳定的重组碳,碳库则相对稳定。

表 2 洞庭湖湿地轻组碳含量

Table 2 Content of light fraction of organic carbon at profiles in Dongting Lake

| 深度/cm | 洞庭湖湿地轻组碳占总有机碳的百分比 / % |       |      |      |       |      |      |      |
|-------|-----------------------|-------|------|------|-------|------|------|------|
|       | 湖草滩地                  |       |      | 芦苇滩地 |       |      | 垦殖水田 |      |
| 0~10  | 49.30                 | 19.73 | 7.69 | 4.93 | 11.07 | 6.92 | 7.26 | 9.78 |
| 10~20 | 15.00                 | 5.73  | 5.78 | 3.95 | 9.15  | 9.74 | 7.24 | 7.18 |
| 20~30 | 6.22                  | 4.70  | 4.63 | 2.47 | 6.97  | 9.82 | 9.12 | 4.04 |
| 30~40 | 15.82                 | 4.40  | 5.00 | 5.45 | 6.20  | 6.11 | 8.48 | 3.53 |
| 40~50 | 6.93                  | 8.25  |      |      |       | 9.23 | 7.85 |      |

3 类湿地在垂直方向上轻组碳含量具有明显的层次性(表 2)。这可能与洪道型湖泊淤积泥沙的有机碳来源的复杂性有关。洪道型湖泊的有机碳不仅包括其生态系统的植物凋落物,对于开放性的水体,每年由水流带入的悬浮有机物也在其中占有一定的比例<sup>[10]</sup>,而这些外源有机碳的差异也是轻组碳含量呈现层次性的一个重要原因。剖面 40~50 cm 以下,轻组有机碳含量极少。3 类湿地土壤有机碳与重组碳之间具有极显著的曲线相关关系(图 2),这说明在一定的范围内,随着总有机碳含量的增加,重组碳增加的比例逐渐减小,而轻组碳所占的比例逐渐增加,这与三江平原沼泽湿地轻组碳含量的变化趋势一致<sup>[5]</sup>。

矿质土壤轻组有机质含量较低。分组过程中分离出的轻组有机质由于量少而无法直接测定其碳含量,因此,本文采用的轻组碳含量为总有机碳减去重组碳。分组过程中,由于绝大部分可溶性有机碳(DOC)被损失掉,大部分的电解质离子已洗掉,少量极细小的粘粒也由于大部分的电解质离子的流失而在离心过程中形成胶体,随水流失,这些因素都可能造成轻组碳的结果偏高。因此,该地区湿地表层轻组碳的实际含量可能低于这一结果。

一般认为,当土壤 C/N 达到平衡时,土壤氮素含量大体上决定了土壤有机碳水平,土壤全氮与土壤有机碳之间具有良好的线性相关关系<sup>[4]</sup>,但洞庭湖滩地土壤的这种相关性并不显著。这也从另一个角度说明了开放水体有机碳来源的复杂性。丰水时期,由水流带进的大量泥沙沉积了一定量来源较复杂的有机物质和矿质养分,这些物质经微生物分解转化后,大部分以稳定的重组碳的形式储存在土壤粘粒之间,因而,重组氮与重组碳之间具有良好的极显著线性相关关系(图 3)。

2.3 有机碳与容重之间的相关关系

湖草滩地表层 0~10 cm,有机碳含量高,容重较小,平均为 0.65 g/cm<sup>3</sup>。芦苇滩地表层 0~10 cm 容重为(1±0.1) g/cm<sup>3</sup>,这可能与洞庭湖的湖洲湿地季节性淹水的水文条件有关。在枯水季节,湖洲湿地土壤的通气状况有所改善,有利于土壤动物和好气微生物的活动,土壤孔隙度增大,因此土壤容重较小。垦殖水田由于人为耕作熟化的影响,改善了土壤的物理结构和通气性能,表层 0~10 cm 土壤容重(0.9±0.1) g/cm<sup>3</sup>与芦苇滩地基本相当。但 10 cm 以下的层次,土壤容重基本在 1.2 g/cm<sup>3</sup> 以上,与长期淹水或流水条件下自然沉积的土壤容重基本相

当洞庭湖3类湿地土壤容重与总有机碳之间呈现极显著的指数相关关系(图4),这与 Avnimelech 等<sup>[11]</sup>的研究结果基本一致.

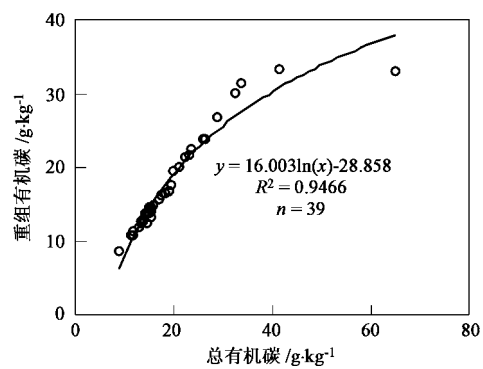


图2 洞庭湖湿地重组碳与总有机碳之间的关系  
Fig.2 Correlation between heavy fraction and total organic carbon in Dongting Lake floodplain

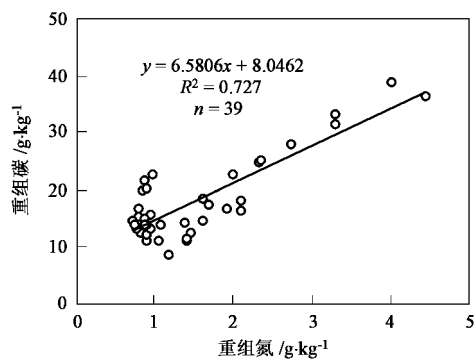


图3 洞庭湖湿地重组碳与氮之间的相关关系  
Fig.3 Correlation between organic carbon and nitrogen in heavy fraction in Dongting Lake floodplain

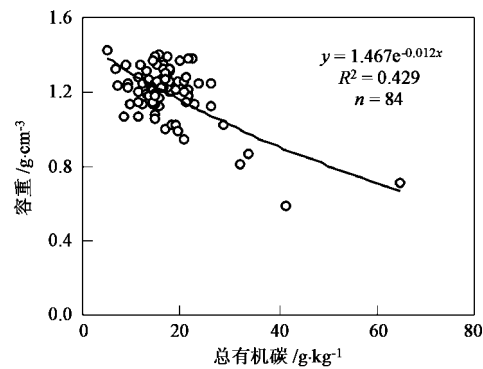


图4 洞庭湖湿地总有机碳与容重之间的关系  
Fig.4 Correlation between organic carbon and bulk density in Dongting Lake floodplain

土壤容重是反映土壤性状的重要指标,它与土壤的水、热状况密切相关.对于湿地土壤而言,土壤

容重的大小不仅能反映出有机质含量高低和土壤的结构状况,而且也是湿地土壤持水、蓄水性能的重要指标之一.湖洲湿地土壤有机碳含量越高、容重越小,持水和蓄水性能越强,这对于湖泊湿地调蓄洪水的能力具有重要意义.

3 结论

洞庭湖3类湿地间有机碳的分布与组成存在一定差异,而同一类型湿地间也存在明显的变异特征.湖草滩地表层0~10 cm有机碳含量较其他2类湿地高,对环境变化和人为干扰反应相对敏感的轻组碳占总有机碳的比例也相对较高,而芦苇滩地和垦殖水田表层主要是稳定的重组碳(占90%以上).3类湿地垂直方向上,受有机碳来源复杂性的影响,轻组碳占总有机碳的比例具有明显的层次性.3类湿地重组碳随总有机碳增加的比例随着总有机碳含量的增加而逐渐减小,重组碳与氮之间具有极显著的线性相关关系,容重与总有机碳之间具有极显著的指数相关关系.

参考文献:

[ 1 ] Waddington J M, Griffis T J, Rouse W R. Northern Canadian wetlands: net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and climatic change [ J ]. Climate Change, 1998, 40: 267 ~ 275 .  
[ 2 ] Froelking S, Roult N T, Moore T R, et al. Modeling Northern peatland decomposition and peat accumulation [ J ]. Ecosystems, 2001, 4(5): 479 ~ 498 .  
[ 3 ] 田应兵,熊明彪,熊小山,等.若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动[ J ].植物生态学报,2003,27(4): 490 ~ 495 .  
[ 4 ] 刘景双,杨继松,于君宝,等.三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[ J ].水土保持学报,2003,17(3): 5 ~ 8 .  
[ 5 ] 张文菊,吴金水,肖和艾,等.三江平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状[ J ].地球科学进展,2004,19(4): 558 ~ 563 .  
[ 6 ] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[ M ].上海:上海科学技术出版社,1980 .  
[ 7 ] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [ J ]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1799 ~ 1806 .  
[ 8 ] 黄进良.洞庭湖湿地的面积变化与演替[ J ].地理研究,1999,18(3): 297 ~ 304 .  
[ 9 ] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, et al. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools [ J ]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58(4): 1130 ~ 1139 .  
[ 10 ] Lee S Y. Primary productivity and particulate organic matter flow in an estuarine mangrove wetland in Hong Kong [ J ]. Marine Biology, 1990, 106(3): 453 ~ 463 .  
[ 11 ] Avnimelech Y, Gad R, Leon E M, et al. Water content, organic carbon and dry bulk density in flooded sediments [ J ]. Aquacultural engineering, 2001, 25(1): 25 ~ 33 .