

# Technologies and Methods Applied in Exotic *Spartina alterniflora* Salt Marsh SOC Cycling Researches

Jin'e Liu<sup>1\*</sup>, Hairong Su<sup>1</sup>, Huang Huang<sup>1</sup>, Shaoqing Fu<sup>1</sup>, Guoxiang Wang<sup>1</sup>, Jianqin Chen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>The Environmental School of Nanjing Normal University, Jiangsu Center of Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Science and Chemistry, Jiangsu Second Normal University, Nanjing Jiangsu

Email: liujine@njnu.edu.cn, jqchen1102@126.com

Received: Oct. 21<sup>st</sup>, 2017; accepted: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2017; published: Nov. 9<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

*Spartina alterniflora* was introduced in China in 1979 and the ecological effects on local coastal wetlands have been discussed. This paper reviewed the popular methods, technologies and results in *S. alterniflora* salt marsh soil carbon cycling, including the soil organic carbon separation methods, salt marsh soil organic carbon structure, carbon sources identification measures and related results. Suggestions were presented as: more *S. alterniflora* salt marsh study regions should be covered and compared; multiple technologies and methods were advised to be utilized and verified; carbon exchanges fluxes between *S. alterniflora* salt marsh and neighboring ecosystems should be examined and monitored; *S. alterniflora* salt marsh carbon sequestration driven factors are valuable issues, as well as the human activities and global changes affecting mechanism on salt marsh carbon cycling, which will contribute to its functions as carbon sink.

## Keywords

Salt Marsh, Stable Isotopic Carbon, Specific n-Alkanes <sup>13</sup>C, <sup>13</sup>C NMR, Carbon Cycling

# 互花米草盐沼土壤有机碳循环研究方法与技术

刘金娥<sup>1\*</sup>, 苏海蓉<sup>1</sup>, 黄 黄<sup>1</sup>, 符少卿<sup>1</sup>, 王国祥<sup>1</sup>, 陈建琴<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>南京师范大学环境学院, 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京

<sup>2</sup>江苏第二师范学院生命科学与化学学院, 江苏 南京

Email: liujine@njnu.edu.cn, jqchen1102@126.com

\*通讯作者。

文章引用: 刘金娥, 苏海蓉, 黄黄, 符少卿, 王国祥, 陈建琴. 互花米草盐沼土壤有机碳循环研究方法与技术[J]. 世界生态学, 2017, 6(4): 173-179. DOI: 10.12677/ije.2017.64021

## 摘要

互花米草(*Spartina alterniflora*)引入中国30余年,其生态效应受到广泛关注。本文总结了在互花米草盐沼土壤碳循环中用到的关键研究方法、研究技术和相关成果,包括盐沼土壤有机质分组方法,海滨湿地有机碳结构、来源及判定方法,以及相关研究结果。未来研究方向建议:加强不同区域和不同环境条件之间的比较研究;加强多种新技术手段的综合应用;滨海盐沼湿地碳与邻近生态系统之间的交换通量核算与监测;加强盐沼碳赋存控制因素的研究,预测全球变化和人类活动对碳循环的影响机制,提升我国盐沼固碳能力。

## 关键词

盐沼, 稳定碳同位素, 正构烷烃单体同位素,  $^{13}\text{C}$ 核磁共振质谱, 碳循环

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

海滨盐沼是全球最高产的生态系统[1],兼有“碳源”与“碳汇”的双重功能,其碳循环对大气全球碳收支以及与之有关的全球气候变化有重要影响。土壤有机碳对于土壤理化特性和营养功能起着关键作用[2],研究盐沼土壤有机碳循环对提高陆地土壤-大气碳通量的计算精度、科学评估土壤碳汇潜力及动态具有重要意义。互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)是研究生物入侵生态学和遗传学特征的模式植物之一,引入我国沿海湿地30余年,在我国扩张规模远大于世界上其它地区,其对当地生态系统碳循环的生态效应广受关注[3]。本文对互花米草盐沼土壤碳循环的研究方法和技术进行总结。

## 2. 土壤有机碳分组方法

目前,土壤有机碳的分组方法较多,主要有以下三类:物理分组法、化学分组法以及生物学分组法。

物理分组法对土壤有机碳结构的破坏程度最小,因此可以较好的反映出不同组分有机碳的动态变化、结构和功能特征,特别是周转率特征[4]。物理分组法包括对土壤有机碳的密度分组(density separates)和颗粒大小分组(size separates) [5]。土壤有机碳的密度分组法,将土壤分散后在一定比重(一般为 $1.6\sim 2.0\text{ g/cm}^3$ )的溶液中将有机碳分离成轻组有机碳和重组有机碳,它们中的有机质分别称为轻组有机质(light fraction organic matter, LFOM)和重组有机质(heavy fraction organic matter, HFOM) [6]。轻组有机质的主要成分为动植物残体、菌丝体、孢子、单糖、多糖、半木质素[7],是介于动植物残体与腐殖质类物质之间的一个中间碳库,其有机碳含量和其它养分含量高于腐殖质类物质,转化时间也很短,在1~15年左右,是土壤中的易分解碳库[4]。轻组有机质中含有丰富的有利于土壤微生物分解的基质,其分解速率是HFOM的2~11倍,故LFOM对于耕作管理等生产措施的响应比总有机质更快[8]。重组有机质的主要成分是腐殖质,以有机-无机复合体的形式存在,分解速度极慢,其含量一般占总有机质含量的70%~80% [6]。重组有机质中一部分易溶于盐溶液的有机质对气候、植被类型、施肥以及耕作反应非常敏感[7]。土壤有机碳颗粒

分组法,按照土壤有机碳颗粒大小将土壤有机碳分为5个粒级:细黏粒(粒径小于0.2 μm)有机碳、粗黏粒(粒径在0.2~2 μm)有机碳、粉粒(粒径在2~53 μm)有机碳、细砂粒(粒径在53~250 μm)有机碳和粗砂粒(粒径在250~2000 μm)有机碳[9]。植物残体和微生物体是砂粒中有机碳的主要成分[8],其分解转化的产物很大程度上会转化为其他粒级有机碳的组分[10]。

土壤有机碳的化学分组法主要是基于土壤有机碳各组分在各种提取剂(如水、稀酸、氧化剂的水溶液等)中的溶解性、水解性和化学反应性进行的[11],根据腐殖类物质在水、稀酸以及水溶液中的溶解性可将其分类为水溶态、游离态、难溶态或者胡敏酸、富啡酸、胡敏素等其他酸类[12]。目前化学分组法最普遍采用的是用 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 和 $\text{NaOH}$ 来对腐殖质进行萃取和酸水解法来进行分组[13]。酸水解法一般采用硫酸或盐酸进行水解,通过水解作用可将有机碳分为活性碳库和顽固性碳库,继而可以计算有机碳的惰性指数,从而衡量惰性有机碳库的大小。经核磁共振波谱检验表明,土壤有机碳中能被水解的成分主要是蛋白质、多糖和核酸等,未能被水解的成分主要是脂肪、树脂、木质素和软木脂等[14]。Golchin等人[15]和Roscoe等人[16]依物理保护程度不同,将有机碳分成3类:没有保护的自由轻组、闭合的轻组和保护的重组,Rovira和Vallejo[12]用酸水解法,继续把自由轻组、闭合组分和重组中有机质分组为活性库 I (Labile Pool I, LP I)、活性库 II (Labile Pool II, LP II)和顽固性组分(recalcitrant fraction)。

土壤中的微生物是参与陆地碳循环的重要组成部分,微生物生物量是指土壤中体积小于5~10 μm的活的微生物总量,包括真菌、细菌以及微动物体等[14],并且微生物生物量与土壤众多的理化性质呈一定的正相关关系[17]。由于微生物生物量碳周转期一般少于5年,所以是土壤活性有机碳库的重要组成部分。一般采用氯仿熏蒸法或氯仿熏蒸培养法测定土壤微生物生物量碳[11]。

### 3. 土壤有机碳结构特征研究技术

当有机碳进入土壤后,在土壤中经过一系列生物降解过程(biodegradation processes),转变成腐殖质,或经过土壤无机组成的催化聚合作用形成腐殖质。核磁共振波谱法(Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy, NMR)在研究有机化合物的结构中占有特殊的地位,是各领域中必不可少的研究手段,核磁共振波谱与有机质谱、红外光谱、紫外光谱并称为四大光谱[18]。核磁共振技术具有以下优点:不破坏样品的结构,可直接测定土壤有机碳的结构;可定性、定量分析,预处理过程简单。当采用固体核磁共振技术时,只需通过简单的物理处理,即可上机测试。核磁共振技术手段多,谱图内涵丰富,全面提供土壤样品有机质成分信息[19]。谱图中不同的峰对应不同的碳结构,而峰的高度及面积则代表了该组分的相对含量高低。图谱积分面积转化为百分比后的相对含量,清楚地反映不同碳组分在有机质中的相对含量[20]。土壤有机碳固态 NMR 碳谱,主要可划分为4个共振区域,烷基碳(Alkyl C)区,0~45 ppm;烷氧碳区(O-alkyl C)区,45~110 ppm;芳香碳(Aromatic C)区,110~160 ppm;羧基碳(Carboxyl C)区,160~200 ppm。互花米草盐沼土壤中有有机碳形态以烷氧碳和芳香碳为主,芳香碳的平均比例(35.85%)最高,其次为烷氧碳(32.83%)和羧基碳(20.62%),烷基碳的平均比例(11.76%)最低[21]。近年来,随着高磁场核磁共振商品仪器的不断改进,各种 NMR 新技术,尤其是 2DNMR 新技术取得了很大的发展,不仅用于确定化合物平面结构,而且可确定一些化合物的相对构型或绝对构型。目前运用 NMR 技术主要是借助于偶合常数、 $^1\text{H}$ NMR 技术和  $^{13}\text{C}$  NMR 技术进行复杂有机化合物的相对构型的确定[22]。

### 4. 海滨湿地有机碳来源及判定方法

当前对于湿地有机碳来源的辨析主要有以下三种方法:碳氮比值法(C/N)、生物标志物法以及稳定同位素法。

湿地生态系统中不同来源的有机碳,化学组成成分差异显著,碳氮元素的比值是用来判别土壤中有

机碳海陆来源的一种常见方法。通常陆地高等维管植物 C/N 比值高于海洋浮游藻类, 相关研究表明, 浮游植物的 C/N 比值范围在 6~10 [23], 水生生物的 C/N 比值为 6~9, 细菌的 C/N 比值在 2.6~5, 而高等植物的 C/N 高达 14~23 [24], 软组织的 C/N 在 10~100, 木质组织的 C/N 在 100~1000 [25], 石油的 C/N 比在 79 左右, 污水的 C/N 比在 12.5 左右。据盐城海滨湿地土壤有机碳的研究结果表明, 有机碳与 C/N 显著正相关, 但不同湿地之间土壤 C/N 对有机碳及全氮含量的敏感性存在差别[26]。

生物标志化合物是根据生物体死亡后在沉积埋藏作用及早期成岩作用过程中, 受到微生物作用、埋藏作用、无机催化作用的影响, 经过复杂的物理化学反应, 最终生成稳定的有机化合物[27], 它们在沉积作用过程中具有良好的稳定性和对原始生物母质特征的继承性, 是识别有机碳来源的指纹标志物[28]。生物标志化合物与对应的生物源有一定的结构上的相关性和联系, 从而具有指示环境与物源的作用[29]。生物标志物最早应用于沉积矿产和古沉积环境的研究, 近年来已成为沉积物分析中的一项重要手段, 正逐渐被应用于湿地有机碳溯源的研究。湿地土壤中有机碳的来源主要可以分为以下几类: 蛋白质、腐殖质、碳水化合物以及类脂化合物(烃类、脂肪酸、甾体化合物和脂肪醇等), 研究上述化合物在湿地土壤中的组成结构以及分布特征, 可以为了解土壤有机碳来源以及转化过程提供大量信息, 但目前针对海滨湿地沉积物的生物标志物法研究相对较少[29]。

稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )技术是近年来用于探明土壤有机碳生物来源以及历史动态变化的新方法。该方法实质是一种天然标记法, 无放射性[30], 能够计算不同植物来源的土壤有机质的比例[31], 既能研究土壤有机质总体的动态情况[32]; 也可以研究不同颗粒大小或密度部分有机质的动态变化[33]; 还可以研究不同农业措施[18]以及不同环境条件对土壤有机质动态的影响[34]。

碳同位素比值的计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[ \frac{(m^{13}\text{C}/m^{12}\text{C})}{(m^{13}\text{Cst}/m^{12}\text{Cst})} \right]$$

$m^{12}\text{C}$ 、 $m^{13}\text{C}$  分别表示待测样品中  $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$  的质量,  $m^{12}\text{Cst}$ 、 $m^{13}\text{Cst}$  表示标准样品  $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$  的质量。稳定碳同位素研究中的国际通用标准样品为 PDB (Peedee Belemnite), 即美国南卡罗来纳州白垩皮狄组拟箭石化石。

土壤有机质主要来源于植物残体, 其  $\delta^{13}\text{C}$  值与来源植物物料的  $\delta^{13}\text{C}$  值十分接近,  $\delta^{13}\text{C}$  值变化幅度一般在 0.5‰~1.5‰ 范围内。不同植物光合途径有差异, 对  $^{13}\text{C}$  的吸收能力不同, 具有分馏作用, 具有不同的  $\delta^{13}\text{C}$  值。陆生以  $\text{C}_3$  途径进行光合作用的植物富集  $\delta^{13}\text{C}$  约为 -25‰~-29‰,  $\text{C}_4$  植物  $\delta^{13}\text{C}$  在 -10‰~-16‰ 之间; 景天科酸代谢植物(CAM 植物)  $\delta^{13}\text{C}$  从 -10‰~-22‰。因此,  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物条件下土壤有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值在理论上应有 12‰~14‰ 的差值。如果出现了  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物的更替, 则土壤有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值将会发生改变, 这是用  $\delta^{13}\text{C}$  方法研究土壤有机质转化、周转及动力学的基础。 $\delta^{13}\text{C}$  分析法能从年到百年尺度研究整个碳循环过程, 有效阐明土壤碳动态和土壤碳储量的迁移、变化和转换过程, 直接计算出土壤及其各组分中不同植物来源有机质的比例和数量, 量化评估新老土壤有机碳对碳储量的相对贡献。

例如, 根据互花米草活体植株的( $\text{C}_4$  植物)的  $\delta^{13}\text{C}$  特征值介于 -12.2‰~-13.6‰ [35], 衰老的茎、叶  $\delta^{13}\text{C}$  特征值介于 -12.8‰~-12.9‰ [36] [37]。虽然有研究报告[36]在有氧分解的过程中  $\delta^{13}\text{C}$  特征值没有变化, 但是也有研究[38]显示凋落物被埋进沉积物中一年后  $\delta^{13}\text{C}$  特征值从 -13.6‰ (新鲜互花米草) 下降至 -15‰~-16‰。长江口互花米草  $\delta^{13}\text{C}$  值分别为叶 -12.8‰, 凋落物 -13.4‰, 根 -13.1‰ [39]; 江苏沿海互花米草茎叶 -13.80‰, 根 -13.85‰。辨别盐沼沉积物有机质中  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物来源比较复杂, 如果有机质中有来自浮游植物的贡献,  $\delta^{13}\text{C}$  值会介于上述两种植物特征值之间。 $\text{C}_3$  来源的有机质通常认为比来自互花米草的有机质(无论新鲜组织还是降解后)组分较轻,  $\delta^{13}\text{C}$  值介于 -22.8‰~-29.3‰ [35]。根据稳定同位素分析以及 C:N 比结果, 中国沿海互花米草盐沼土壤有机质以陆源为主[40]。

## 5. 单体同位素分析技术

气相色谱同位素比值质谱(GC-C-IRMS 或 GC-TC-IRMS)是近些年发展起来的能在线分析混合物中各个化合物同位素组成的新技术, 被称为单体同位素分析技术(Compound Specific Isotope Analysis, CSIA), 是目前在环境研究中最广泛使用的碳同位素分析技术。该技术可以在线分离和分析浓度为  $1 \times 10^{-6}$  级混合物中单个化合物的稳定同位素组成[41], 在生物源识别、 $C_3$  与  $C_4$  植被类型确定、全球碳循环等方面得到了应用, 使稳定同位素测定达到分子级水平, 为局部或全球古气候研究、全球碳循环的控制机制提供了新的更加准确的证据[42]。

沉积物中的正构烷烃一般不易发生降解, 能够真实地反映生物体贡献的原始正构烷烃分布[36]。正构烷烃的峰群分布特征和碳优势指数(CPI)可表征不同来源的有机质贡献。陆源高等植物表皮蜡中含有大量  $C_{27}$ 、 $C_{29}$  及  $C_{31}$  正构烷烃化合物, 呈明显的奇偶优势, 其碳优势指数即 CPI 值一般大于 5 [37]。多数水生藻类与浮游细菌的正构烷烃碳数分布范围为  $C_{15}$ - $C_{20}$ , 为以  $C_{17}$  正构烷烃为主的单峰型分布, 但一些蓝藻细菌以  $C_{19}$  为主, 无明显的奇偶优势[43]。正构烷烃分子标志化合物在生物输入源的识别、植被演化序列重建、源区气候变化相应、古温度指示、古气候研究中得到广泛应用, 但是存在以下缺陷: 一是不同类型生物体中可能存在相同或相似的正构烷烃组成, 导致来自众多生物源的正构烷烃混合输入难以区分; 二是正构烷烃分子标志物在埋藏中可能会或多或少地受到降解演化的破坏, 使相应的生物源辨认模糊。单体正构烷烃的碳同位素的研究则弥补了这些不足, 通过单体正构烷烃的碳稳定同位素比值的差别, 为精确区分正构烷烃的生物源提供了有用的信息。如单体叶蜡正构烷烃来源的  $\delta^{13}C$  值较整个植物组织低约 6‰~8‰, 即来自  $C_4$  植物的正构烷烃富集  $^{13}C$ , 约为 -19‰ (平均值),  $C_3$  植物则相对富集  $^{12}C$ , 约为 -34‰ [44]。研究证实,  $C_3$  植物正构烷烃碳同位素值通常随着碳数的增加而变轻, 而  $C_4$  植物的正构烷烃碳同位素值随碳链的增加则几乎不变[42]。这种分子级水平的同位素差异已成功用于识别沉积物中  $C_3$  与  $C_4$  陆生植物相对比例的时空变化[43]。分子水平的碳同位素分析实际上是唯一区别这不同种生物源单体的有效途径, 能够直接提供生物源的精确输入信息。

## 6. 展望

目前互花米草盐沼碳循环的研究还存在覆盖区域有限、碳源辨析不足、影响因子研究较少等问题, 缺乏系统性, 对机制的理解十分薄弱, 因此难以对碳埋藏能力的提升提供定量化的指导。今后的研究要从以下几个方面加强: 不同区域和不同环境条件之间的比较研究; 多种技术手段的验证研究, 用多种特异性的标志物, 精确区分有机碳来源, 并比较不同来源有机质的沉积稳定性; 滨海盐沼湿地碳与邻近生态系统之间的交换通量核算与监测; 加强盐沼碳赋存控制因素的研究, 以及全球变暖、海平面上升、富营养化等对盐沼碳库稳定性的影响, 预测气候变化和人类活动对碳循环的影响机制, 提升我国盐沼湿地固碳能力。

## 基金项目

国家自然科学基金(41273082), 国家重大基础科学研究计划项目(973 计划项目) (2014CB953801)。

## 参考文献 (References)

- [1] Mitsch, W.J. and Gossilink, J.G. (2000) *Wetlands*. 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 261-305.
- [2] Trumbore, S.E. and Czimeczik, C.I. (2008) Geology. An Uncertain Future for Soil Carbon. *Science*, **321**, 1455-1456. <https://doi.org/10.1126/science.1160232>
- [3] Chung, C.H. (2006) Thirty Years of Ecological Engineering with *Spartina* Plantations in China. *Ecological Engineering*, **2**, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.09.012>

- [4] Christensen, B.T. (1992) Physical Fractionation of Soil and Organic Matter in Primary Particle Size and Density Separates. *Advances in Soil Science*, **20**, 2-90. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1)
- [5] 胡慧蓉, 马焕成, 罗承德, 等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1018-1024.
- [6] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 19-29.
- [7] Christensen, B.T. (2001) Physical Fractionation of Soil and Structural and Functional Complexity in Organic Matter Turnover. *European Journal of Soil Science*, **52**, 345-353. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x>
- [8] 武天云, Schoenau, J.J., 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 717-722.
- [9] Anderson, D.W., Saggart, S., Bettany, J.R., et al. (1981) Particle-Size Fractions and Their Use in Studies of Soil Organic Matter I. The Nature and Distribution of Forms of Carbon, Nitrogen, and Sulfur. *Soil Science Society of America Journal*, **45**, 767-772. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500040018x>
- [10] Christensen, B.T. and Sorensen, L.H. (1985) The Distribution of Native and Labeled Carbon between Soil Particle-Size Fractions Isolated from Long-Term Incubation Experiments. *European Journal of Soil Science*, **36**, 219-229. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1985.tb00326.x>
- [11] 中科院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 136-142.
- [12] Rovira, P. and Vallejo, V.R. (2002) Labile and Recalcitrant Pools of Carbon and Nitrogen in Organic Matter Decomposing at Different Depths in Soil: An Acid Hydrolysis Approach. *Geoderma*, **107**, 109-141. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00143-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00143-4)
- [13] Rovira, P. and Vallejo, V.R. (2000) Examination of Thermal and Acid Hydrolysis Procedures in Characterization of Soil Organic Matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **31**, 81-100. <https://doi.org/10.1080/00103620009370422>
- [14] 周脚根, 黄道友. 土壤微生物量碳周转分析方法及其影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 131-134.
- [15] Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., et al. (1994) Study of Free and Occluded Particulate Organic Matter in soils by Solid State  $^{13}\text{C}$  CP/MAS NMR Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, **32**, 285-309. <https://doi.org/10.1071/SR9940285>
- [16] Roscoe, R., Buurman, P., Velthorst, E.J., et al. (2001) Soil Organic Matter Dynamics in Density and Particle Size Fractions as Revealed by the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  Isotopic Ratio in Cerrado'soxisol. *Geoderma*, **104**, 185-202. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00080-5)
- [17] 张海燕, 肖延华, 张旭东, 等. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 422-425.
- [18] Belesdent, J., Mariotti, A. and Bisgontier, D. (1990) Effect of Tillage on Soil Organic Carbon Mineralization Estimated from  $^{13}\text{C}$  Abundance in Maize Fields. *Journal of Soil Science*, **41**, 587-596. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00228.x>
- [19] 王俊美, 欧阳捷, 尚倩, 等. 土壤有机质研究中的核磁共振技术[J]. 波普学杂志, 2008, 25(2): 287-295.
- [20] 李国栋, 刘国群, 庄舜尧, 等. 不同种植年限下雷竹林土壤的有机质转化[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 845-849.
- [21] 杭子清, 王国祥, 刘金娥, 等. 互花米草盐沼土壤有机碳库组分及结构特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4175-4182.
- [22] 邵思远, 杨桢楠, 张培成. 核磁共振在确定链状化合物相对构型中的应用[J]. 国际药学研究杂志, 2015, 42(6): 699-705.
- [23] Coifuentes, A.J., Ferguson, R.L. and Thayer, G.W. (1983) Environmental Gradients and Benthic Macroinvertebrate Distributions in a Shallow North Carolina Estuary. *Bulletin of Marine Science*, **33**, 282-295.
- [24] Bordovskiy, O.K. (1965) Accumulation and Transformation of Organic Substances in Marine Sediments. *Marine Geology*, **3**, 113-114. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(65\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(65)90002-2)
- [25] Yamamuro, M. (2000) Chemical Tracers of Sediment Organic Matter Origins in Two Coastal Lagoons. *Journal of Marine Systems*, **26**, 127-134. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(00\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(00)00049-X)
- [26] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 293-297.
- [27] 张龙军, 宫萍, 张向上, 等. 河口有机碳研究综述[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(5): 737-744.
- [28] Grimalt, J.O. and Olive, J. (1993) Source Input Elucidation in Aquatic Systems by Factor and Principal Component Analysis of Molecular Marker Data. *Analytica Chimica Acta*, **278**, 159-176. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(93\)80094-2](https://doi.org/10.1016/0003-2670(93)80094-2)

- [29] Quirk, M.M., Wardroper, A.M.K., Wheatley, R.E., *et al.* (1984) Extended Humanoids in Peat Environments. *Chemical Geology*, **42**, 25-43. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(84\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(84)90003-2)
- [30] Hgberg, P. and Ekblad, A. (1996) Substrate-Induced Respiration Measured *in Situ* in a C<sub>3</sub>-Plant Ecosystem Using Additions of C<sub>4</sub> Sucrose. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**, 1131-1138. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00124-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00124-1)
- [31] Vitorello, A., Cerri, C.C., Andreux, F., *et al.* (1989) Organic Matter and Natural Carbon  $\delta^{13}\text{C}$  Distribution in Forested and Cultivated Oxisols. *Soil Science Society American Journal*, **53**, 773-778. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030024x>
- [32] Rao, I.M., Ayarza, M.A. and Thomas, R.J. (1994) The Use of Carbon Isotope Ratios to Evaluate Legume Contribution to Soil Enhancement in Tropical Pastures. *Plant and Soil*, **162**, 177-182. <https://doi.org/10.1007/BF01347704>
- [33] Cadisch, G., Imhof, H., Urquiaga, S., *et al.* (1996) Carbon Turnover ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and Nitrogen Mineralization Potential of Particulate Light Soil Organic Matter after Rainforest Clearing. *Soil Biology & Biochemistry*, **28**, 1555-1567. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00264-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00264-7)
- [34] 张晋京, 窦森. 土壤有机质研究中的  $\delta^{13}\text{C}$  方法[J]. 土壤通报, 1999, 30(5): 235-238.
- [35] Goni, M.A. and Thomas, K.A. (2000) Sources and Transformation of Organic Matter in Surface Soils and Sediments from a Tidal Estuary (North Inlet, South Carolina, USA). *Estuaries*, **23**, 548-564. <https://doi.org/10.2307/1353145>
- [36] Tissot, B. and Welte, D.H. (1984) Petroleum Formation and Occurrence. Springer-Verlag, Berlin, 643-644. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>
- [37] Cranwell, P.A., Eglinton, G. and Robinson, N. (1987) Lipids of Aquatic Organisms as Potential Contributors to Lacustrine Sediments-II. *Organic Geochemistry*, **11**, 513-527. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(87\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(87)90007-6)
- [38] Dai, J. and Sun, M.Y. (2007) Organic Matter Sources and Their Use by Bacteria in the Sediments of the Altamaha Estuary during High and Low Discharge Periods. *Organic Geochemistry*, **38**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.10.002>
- [39] Cheng, X.L., Luo, Y.Q., Chen, J.Q., *et al.* (2006) Short-Term C<sub>4</sub> Plant *Spartina alterniflora* Invasions Change the Soil Carbon in C<sub>3</sub> Plant-Dominated Tidal Wetlands on a Growing Estuarine Island. *Soil Biology & Biochemistry*, **38**, 3380-3386. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.05.016>
- [40] Liu, J.E., Han, R.M., Su, H.R., *et al.* (2017) Effects of Exotic *Spartina alterniflora* on Vertical Soil Organic Carbon Distribution and Storage Amount in Coastal Salt Marshes in Jiangsu, China. *Ecological Engineering*, **106**, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.041>
- [41] 郑艳红, 程鹏, 周卫建. 正构烷烃及单体碳同位素的古植被与古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 25(1): 99-104.
- [42] Kuypers, M.M.M., Pancost, R.D. and Sinninghe, D.J.S. (1999) A Large and Abrupt Fall in Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration during Cretaceous Times. *Nature*, **399**, 342-345. <https://doi.org/10.1038/20659>
- [43] Yamada, K. and Ishiwatari, R. (1999) Carbon Isotopic Compositions of Long-Chain N-Alkanes in the Japan Sea Sediments: Implications for Paleo Environmental Changes over the Past 85 kyr. *Organic Geochemistry*, **30**, 367-377. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(99\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00012-1)
- [44] Rieley, G., Collister, J.W., Stern, B., *et al.* (1993) Gas Chromatography-Isotope Ratio Mass Spectrometry of Leaf Wax N-Alkanes from Plants of Differing Carbon Dioxide Metabolisms. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **7**, 488-491. <https://doi.org/10.1002/rcm.1290070617>

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-7967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ije@hanspub.org](mailto:ije@hanspub.org)