

# 鄱阳湖湿地土壤有机碳空间分布及其影响因素

王经波<sup>1,2,3</sup> 郑利林<sup>4</sup> 郭宇菲<sup>1,2,3</sup> 蔡永久<sup>1,2</sup> 王晓龙<sup>1,21</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241)

**【摘要】:** 湿地土壤有机碳是联系湿地系统内外部物质循环的重要纽带, 在湿地生态系统和全球碳循环中起着重要作用。鄱阳湖作为长江中下游大型通江湖泊, 其湿地系统内部的土壤有机碳的循环和转换, 对于区域甚至全球的碳格局和碳平衡都具有重要意义。通过系统调查与样品采集分析, 探讨了鄱阳湖土壤有机碳的空间分布格局及其与土壤性状、植被以及高程等要素的关系。结果表明: (1) 鄱阳湖湿地土壤有机碳平均含量为 4.38%。在主湖区中部偏北以及南部湖湾区含量较高, 在北部入江通道含量最低; 河口冲积洲滩和碟形湖的有机碳含量明显高于河道; (2) 基于地理加权回归 (GWR) 模型, 总氮、总磷、含水率、高程和植被归一化指数 (NDVI) 整体上解释了鄱阳湖湿地土壤有机碳 35.28% 的变化 (整体  $R^2=0.35$ )。局部  $R^2$  值东南高, 西北低, 并且碟形湖和洲滩的局部  $R^2$  值明显高于河道 ( $p<0.01$ ); (3) 不同因子对于有机碳的影响的强弱程度在不同区域呈现出不同特征。总氮和有机碳之间的联系在西部湖区较强, 在河道以及洲滩上较强; 总磷在湖区东南部和西北部均较强, 在洲滩和碟形湖中影响力较强; 含水率对于有机碳的影响在全湖尺度上差异较小; NDVI 的影响在东部和南部较强, 在洲滩和碟形湖较强; 海拔在湖区东南部的影响较强, 在洲滩和碟形湖中较强。

**【关键词】:** 土壤有机碳 分布特征 影响因素 鄱阳湖

**【中图分类号】:** S153.6 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)04-0915-12

湿地是地球上水陆相互作用形成的独特生态系统, 包括天然沼泽、河流、湖泊、浅海和滩涂湿地以及人工湿地 (稻田、水库等)。其面积虽然仅占陆地面积的 4%~6%, 但其碳储量却占到了陆地生态系统碳库的 12%~20%, 仅次于海洋和热带雨林位居第三<sup>[1]</sup>。作为湿地碳库中的重要组成部分的有机碳, 一方面, 显著影响着湿地生态系统的生产力, 对气候的变化异常敏感, 能够作为湿地对气候变化的响应的指示因子<sup>[2]</sup>; 另一方面, 湿地土壤有机碳的积累与矿化是湿地生态系统内外部能量流动和物质循环的重要途径, 极大地影响着区域碳平衡和碳格局状况<sup>[3,4]</sup>, 而该过程的极小变化都有可能改变整个湿地生态系统的碳循环过程, 影响湿地碳的源汇关系<sup>[5,6,7]</sup>。而湿地生态系统经常处于积水状态, 厌氧环境使之积累了更多的土壤有机碳, 加上极高的碳密度, 湿地土壤有机碳库对气候变化更敏感, 因而成为了湿地研究和全球碳循环研究的重点, 受到了广泛关注<sup>[8,9]</sup>。

水文状况被认为是湿地有机碳的重要驱动力, 因为湿地水位的变化会直接改变土壤 pH、厌氧好氧环境以及微生物的活性,

**作者简介:** 王经波(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态。E-mail:1617957416@qq.com; 王晓龙, E-mail:wangxl@niglas.ac.cn

**基金项目:** 国家自然科学基金基金项目 (41971147, 32071572); 中国科学院青年创新促进会项目 (2020316); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA23040203)

进而影响有机质的生成和有机碳的积累与转化<sup>[10,11]</sup>。此外这种干湿交替过程引起的土壤 Eh 以及微生物群落的变化,对于湿地的碳固存的能力有着巨大影响,为有机质的降解和转化提供了条件<sup>[12,13,14]</sup>,并且影响着有机质的数量和质量<sup>[15]</sup>。植被被认为是另一个影响湿地有机碳的重要因素。湿地生态系统中地表植被生物量大,这些植被枯萎和死亡后进入湿地土壤中,是湿地土壤有机碳的重要来源,也使湿地成为“碳汇”的最直接驱动者<sup>[16,17]</sup>。而由于各湿地生态系统或同一湿地生态系统内部植被多样性的不同,导致输入的湿地有机物的数量和性质不同,从而间接导致了不同类型湿地的有机碳的积累与分布的差异<sup>[18,19,20]</sup>。此外,还有学者对景观位置<sup>[21]</sup>以及不同埋深<sup>[22]</sup>对于湿地有机碳的影响进行了研究。尽管很多学者对于湿地有机碳的分布及其影响因素进行了大量研究,但是对于植被、地形地貌以及土壤理化因子与有机碳之间的复杂关系以及这些关系在不同空间尺度上的异质性鲜有报道。

鄱阳湖作为中国最大淡水湖,是一个典型的过水性、吞吐型湖泊,受长江水位和五河(修水、赣江、抚河、信江和饶河)来水的共同影响,湖区呈现明显的丰水期(5~9月)和枯水期(12月至次年2月)。受气候变化和大型水利工程的影响,鄱阳湖湖区水文节律异常,冬季枯水期提前,枯水时间延长,干旱化趋势明显,引起了人们对于鄱阳湖生态系统的关注<sup>[23,24,25]</sup>。近年来,鄱阳湖土壤有机碳含量及动态变化也逐渐受到国内外学者的广泛关注,如鄱阳湖洲滩土壤有机碳时空分布特征<sup>[26,27,28]</sup>、典型植被土壤有机碳循环转化过程<sup>[29,30]</sup>等。但是这些研究大多是选择一块典型的小区域作为研究对象,对于整个湖区尺度上土壤有机碳及其影响因素的研究较为少见。因此,研究鄱阳湖全湖以及三种湿地类型中土壤有机碳的分布格局,探究土壤理化性质(总氮、总磷和含水率)、植被和高程对于鄱阳湖湿地有机碳分布格局的影响,有助于揭示大型通江湖泊土壤有机碳动态平衡与关键影响因素,为维持鄱阳湖湿地生态系统功能提供数据支撑,进而为区域社会经济发展与大型水利工程的生态评估提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

鄱阳湖位于中国东南部,长江中下游交接处的南岸,江西省北部,地理坐标为 28° 24' N~29° 46' N,115° 49' E~116° 46' E。鄱阳湖处在我国东部季风区的中亚热带,属于典型的亚热带季风气候,夏季炎热多雨,冬季低温少雨;年降雨量为 1450~1550mm<sup>[31]</sup>,其中 4~6 月降雨量占到了年总量的近乎一半;最冷月(1月)平均气温 5.1℃,最热月(7月)平均气温 29.5℃。其盆地地形高程范围为 0~20m。鄱阳湖的水位年内变化异常显著,变幅超过 10m,年际间最大变幅可达 16.69m<sup>[32]</sup>,并且不同水位的湖区面积变幅也很大,高水位时(湖口水文站水位 20.75m)面积约为 4500km<sup>2</sup>,低水位时(湖口水文站水位 4.06m)仅为 146km<sup>2</sup><sup>[33]</sup>。

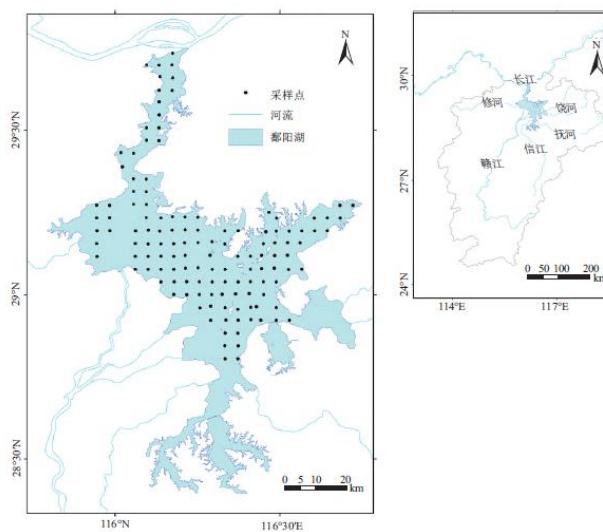


图 1 研究区域及样点分布图

## 1.2 数据的获取与分析

样品采集于2019年7、8月进行。通过彼得森采泥器(采样面积: 1/16m<sup>2</sup>;挖泥深度: 15cm;容积: 7~8L)抓取湖底表面的底泥,并将其密封于聚乙烯袋中。所有样品在低温下保存,并在24h以内运至实验室。同时,用GPS记录每个点的地理坐标。共收集了131份样品。采用常规方法<sup>[34]</sup>测定土壤理化性质(总氮、总磷、含水率),其中,土壤总氮和总磷用自然风干样品测样,总氮(TN)用开氏法测定,土壤总磷(TP)用钼锑抗比色法测定,土壤含水量用鲜样测样,用烘干法测定。通过在500℃下持续4h的灼烧损失来测量土壤有机质烧失量<sup>[35]</sup>,本文中的有机碳含量(SOC)通过有机质烧失量(SOM)换算而来。

本文的遥感影像数据来源于美国地质调查局(USGS, <https://glovis.usgs.gov/app>)。考虑到秋冬季节为枯水期,鄱阳湖洲滩基本出露,且植被处于生长末期,植被生长波动较小,所以选取鄱阳湖地区2018年10月3日Landsat8陆地成像仪(OLI)图像。本文采用NDWI( $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$ )提取水域和陆地分类图,该工作在ENVI中进行。NDVI即植被归一化指数,它用近红外波段的反射值与红光波段的反射值之差比上两者之和计算得出,即 $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ <sup>[36,37,38]</sup>,NIR为近红外波段的反射值,R为红光波段的反射值,此工作也在ENVI中进行。

利用Excel2016进行数据的初步整理,SPSS25.0进行Kolmogorov-Smirnov正态性检验、方差分析和Spearman相关性分析,Origin2018进行绘图处理。

本研究需要考虑到空间的影响,传统回归分析难以反映空间的约束性,故选择地理加权回归(GWR)模型来进行分析。GWR模型是一种局部线性方法,可以生成局部参数( $R^2$ 、模型残差、系数等)。因此可以定量模拟土壤有机质的空间分布差异以及与各因子的空间上的相关性。本文建立的模型如下:

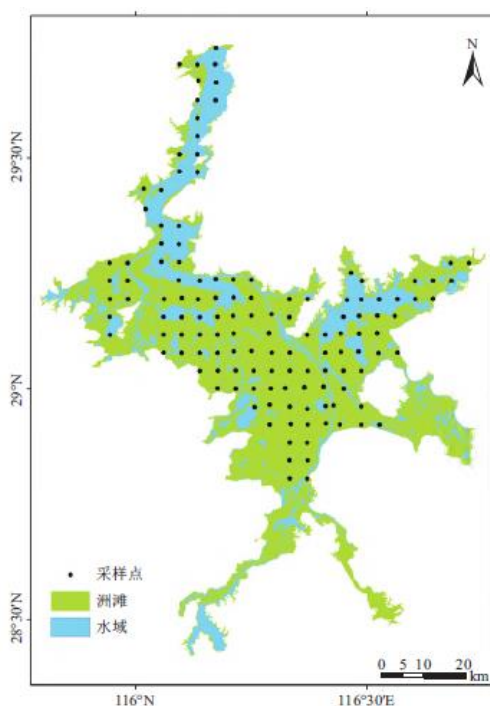


图2 鄱阳湖水陆分异图

$$y_i = \beta_0(u_j, v_j) + \sum_{i=1}^k \beta_i(u_i, v_j) x_{ij} + \varepsilon_j \quad (1)$$

式中： $u_j$  和  $v_j$  是  $j$  点的经纬度坐标； $\beta_0(u_j, v_j)$  是  $j$  点的截距； $\beta_1(u_j, v_j)$  是自变量  $x_{ij}$  的估计局部系数； $\varepsilon_j$  是误差项。

GWR 模型在 ArcGISv. 10.6 软件中进行，采用 AIC<sub>c</sub> 方法进行 GWR 模型带宽的计算，空间插值均采用克里金插值。

## 2 结果与分析

### 2.1 鄱阳湖土壤有机碳及各因子分布

鄱阳湖底泥有机碳含量的差异较大，变化范围在 0.52%~14.33%之间，平均值 4.38%，为其空间变化如图 3。高值出现在中部偏北的都昌县湖域以及南部的南矶山国家级湿地自然保护区内，北部靠近长江的湖道里有机碳含量最低，东部和西部湖域的有机碳含量处于中间值。从不同湿地类型来看，如图 4，洲滩(平均值 4.66%)和碟形湖(平均值 4.46%)的有机碳含量明显高于河道(平均值 3.13%)，而洲滩和碟形湖的差异不大。

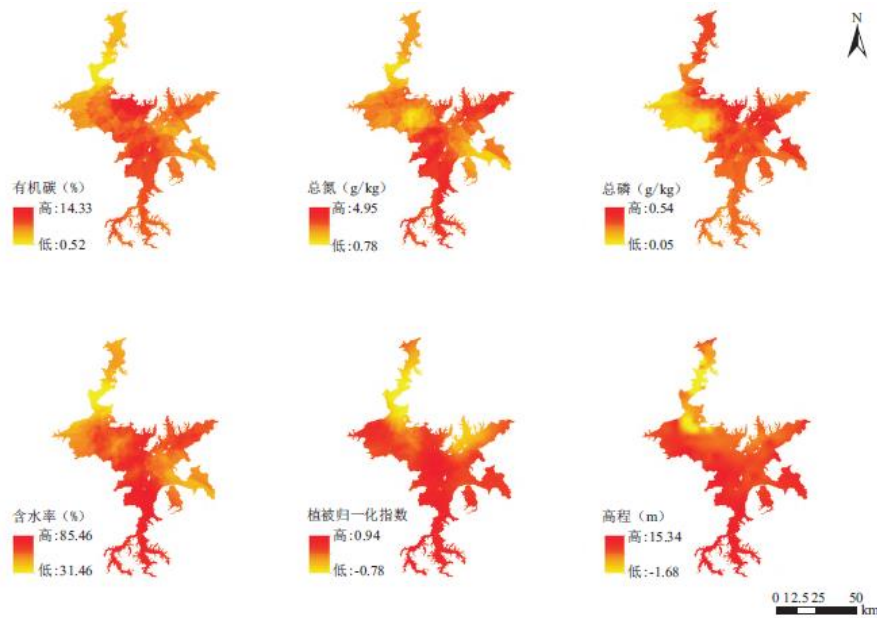


图 3 鄱阳湖湿地土壤有机碳及其影响因素空间分布

鄱阳湖土壤总氮含量在 0.78~4.95g/kg 之间，平均值为 2.55g/kg，在空间上，总氮含量在鄱阳湖南部以及东北部较高，在北部及东南部较低；河道的总氮含量平均值(2.24g/kg)明显低于碟形湖(2.70g/kg)和洲滩(2.60g/kg)，而碟形湖和洲滩之间的差异不明显，碟形湖略高于洲滩。总磷含量范围为 0.05~0.54g/kg，平均值为 0.29g/kg，空间上东部含量较高，西部较低；在河道(0.28g/kg)、碟形湖(0.28g/kg)以及洲滩(0.29g/kg)上总磷含量的平均值差异不明显。鄱阳湖土壤含水率在 31.46%~85.46%之间，平均值为 56.58%，总体上中南部较高，北部以及东南部较低，河道的土壤含水率(37.59%)明显低于碟形湖(49.46%)和洲滩(48.33%)。鄱阳湖地形南高北低，东高西低，整体海拔较低，平均值为 10.96m，在不同类型湿地尺度上，海拔呈现很明显的阶梯式分布，平均值河道(6.41m)<碟形湖(10.62m)<洲滩(12.09m)。NDVI 范围在-0.78~0.94 之间，分布较为混乱，但不难看出高值区集中在湖区西部的洲滩上，而河道和碟形湖的 NDVI(分别为-0.38 和-0.67)要明显低于裸露的洲滩(0.51)。

### 2.2 全湖尺度上的有机碳与各因素的关系

基于斯皮尔曼相关分析，可以看出，有机碳和总氮( $r=0.52$ ,  $p<0.01$ )、总磷( $r=0.40$ ,  $p<0.01$ )以及含水率( $r=0.59$ ,  $p<0.01$ )都

显示出极显著相关关系，与 NDVI ( $r=0.24, p<0.05$ ) 显著相关，与海拔的相关关系不显著 ( $r=0.14, p>0.05$ )。

GWR 模型用于说明有机碳与各因素之间的空间关联性，基于 GWR, 总氮、总磷、含水率、海拔和 NDVI 解释了有机碳 35.28% 的变化 (整体  $R^2=0.35$ )。下图为局部  $R^2$  值和系数的空间分布。局部  $R^2$  值范围在 0.2~0.34 之间，自南向北、自东向西逐渐降低。总氮的回归系数数值在 0.17~0.87 之间，自西向东逐渐降低。总磷回归系数在 -2.83~2.65 之间，从绝对值来看，西北和东南部均较高，中部较低。含水率的回归系数值范围在 0.06~0.09 之间，空间上自东北向西南递减。NDVI 的回归系数数值在 0.16~0.42 之间，东部和南部较高，西北部较低。海拔的回归系数在 -0.12~0.002 之间，从绝对值来看，自东南向西北递减。

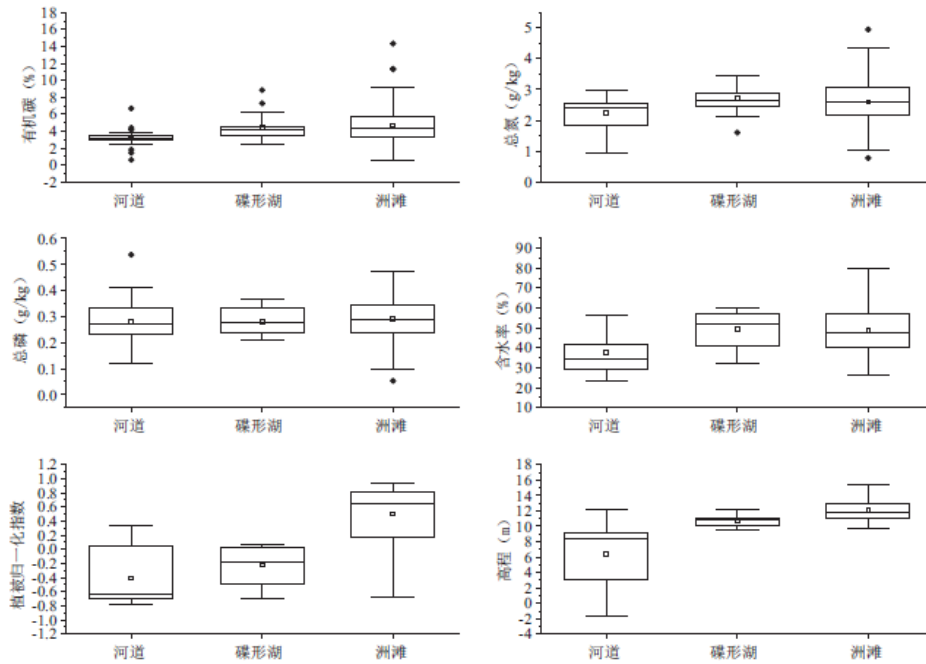


图 4 3 种湿地类型有机碳及其影响因素含量

表 1 鄱阳湖湿地土壤有机碳与各影响因素相关性

	有机碳	总氮	总磷	含水率	植被归一化指数	高程
有机碳	1					
总氮	0.52**	1				
总磷	0.40**	0.55**	1			
含水率	0.59**	0.65**	0.43**	1		
植被归一化指数	0.24*	0.21*	0.11	0.30*	1	
高程	0.14	0.12	-0.09	0.16	0.63**	1

注：\*\*表示在 0.01 水平上显著相关；\*表示在 0.05 水平上显著相关。

### 2.3 三种不同类型湿地中有机碳与各因子的关系

河道、碟形湖、洲滩的局部  $R^2$  值和各因子回归系数如图 6, 碟形湖和洲滩的局部  $R^2$  值明显高于河道 ( $p < 0.01$ ), 而碟形湖和洲滩之间差异不明显 ( $p > 0.05$ )。碟形湖总氮回归系数显著低于洲滩和河道 ( $p < 0.01$ ), 而河道与洲滩之间总氮回归系数差异不显著 ( $p > 0.05$ )。碟形湖和洲滩总磷回归系数的绝对值差异较小 ( $p > 0.05$ ), 但二者回归系数的绝对值都低于河道回归系数的绝对值 ( $p < 0.01$ )。含水率回归系数洲滩 < 河道 < 碟形湖, 但总体上偏低 (0.06~0.09)。NDVI 回归系数碟形湖和洲滩明显高于河道 ( $p < 0.01$ ), 洲滩和碟形湖之间差异不明显 ( $p > 0.05$ )。海拔的回归系数从绝对值来看, 河道明显低于洲滩和碟形湖 ( $p < 0.01$ ), 碟形湖和洲滩之间差异不显著 ( $p > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 鄱阳湖有机碳分布格局

从全湖尺度上来看, 本研究中鄱阳湖有机碳最大值出现在都昌湖域以及南矶山国家自然保护区内。都昌水域有着鄱阳湖区最大的网箱养殖区<sup>[39]</sup>, 网箱养殖一方面会向水体中输入大量的营养元素 (N、P 等)<sup>[40]</sup>; 另一方面, 会产生在残饵、养殖对象的尸体以及粪便<sup>[41]</sup>等可能的沉积物有机碳的主要来源<sup>[42, 43]</sup>。都昌县湖滨地区的植物群落主要有苔草、荻草、狗牙根等<sup>[44]</sup>, 而处于苔草、南荻等群落覆盖下的土壤一般有机质含量较高<sup>[45]</sup>。鄱阳湖南部的南矶山国家自然保护区拥有着约 33 个碟形湖, 生物量异常丰富<sup>[46]</sup>, 并且常年处于淹水状态, 厌氧环境会限制湿地土壤中有机质的分解<sup>[47]</sup>, 加上碟形湖湿地独特的地形, 能够很大程度上保留土壤中的粘粒, 从而有利于有机质的积累<sup>[48]</sup>。另外, 在湿润的亚热带地区, 有机质的分解速率对于有机质积累的影响往往大于有机质的生成速率<sup>[49]</sup>。鄱阳湖北部的靠近长江的河道里有机碳含量较低, 可能是由于鄱阳湖北部地区的水流流速在大多数月份都快于南部地区<sup>[50]</sup>, 有机质会随着水流快速流失, 难以在此区域沉积与积累, JonathanPerez-Rojas 的研究也证明了河流湿地中的有机碳储量明显小于封闭湿地<sup>[51]</sup>。从不同湿地类型来看, 洲滩和碟形湖的有机碳含量明显高于河道的有机碳含量。Wang 等<sup>[52]</sup>通过对比碟形湖湿地(蚌湖)和三角洲湿地(赣江主支三角洲)也得出了碟形湖湿地的储碳能力高于三角洲湿地的结论。碟形湖和洲滩之间的有机碳含量差异不显著, 这可能是由于碟形湖处于一种常年淹水状态, 厌氧环境下有机质的分解速率较慢, 从而导致有机碳含量较高; 洲滩虽然干湿交替显著导致有机质的分解速率较快, 但是洲滩的 NDVI 较高, 植被覆盖度高, 生物量大, 有机质的积累量大, 有机碳含量高。

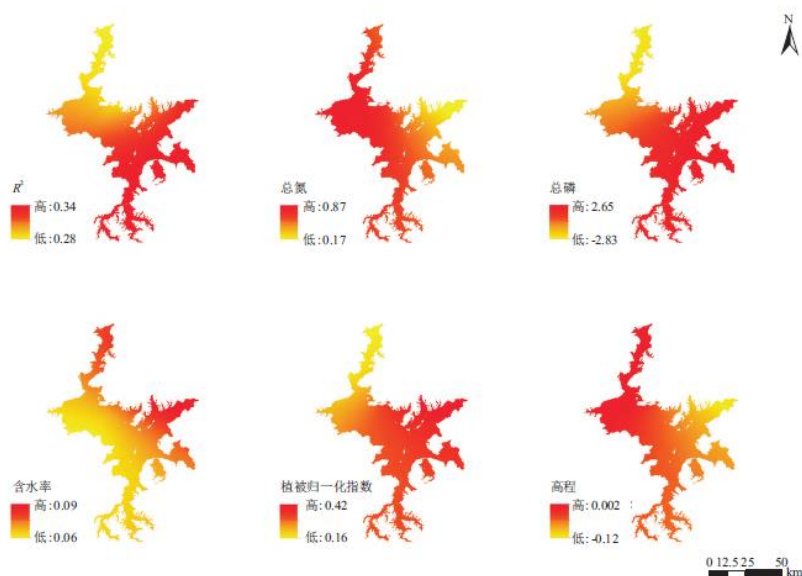


图 5 局部  $R^2$  值和各影响因素回归系数的空间分布

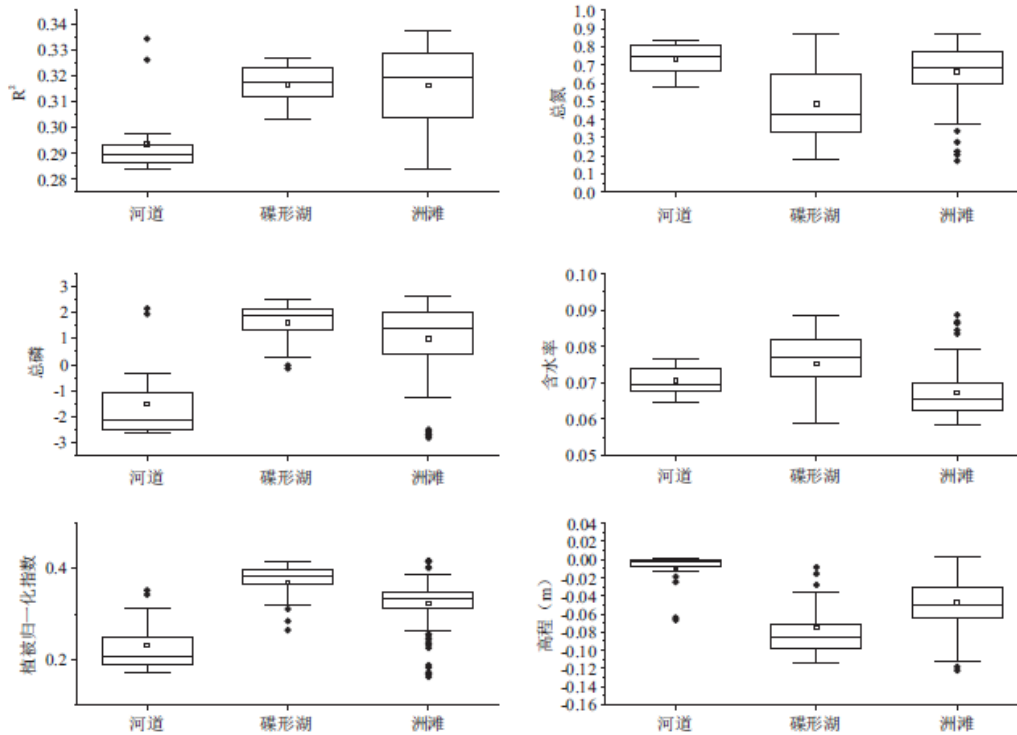


图 6 3 种湿地类型的局部  $R^2$  值和各影响因素回归系数

### 3.2 鄱阳湖湿地土壤有机碳与环境因子之间的关系

本研究中局部  $R^2$  值范围在 0.28~0.34 之间, 自南向北、自东向西逐渐降低。说明湖区南部、东部的土壤有机质受到总氮、总磷、含水率以及植被和海拔的综合影响较大, 北部和西部较弱。鄱阳湖南部湖区较为宽广、湖水较浅, 并且高程较高, 地形复杂多样, 枯水期碟形湖密布, 水陆分异大, 景观破碎度较高, 植被与总氮、总磷、含水率等在该区域内随着不同的环境梯度变化而变化, 对有机碳的分布影响较大。鄱阳湖的有机质主要来源于湖泊水生生物沉淀以及流域输入累积<sup>[53]</sup>。鄱阳湖北部湖区河道较为狭长, 水流流速较南部快, 由湖泊水生生物产生的有机质会随着快速的水流流失, 难以保存和积累; 另一方面, 鄱阳湖南部和西部入湖河道众多, 河口区有机质含量较高可能是流域输入累积的原因<sup>[50,54]</sup>。鄱阳湖西部和北部的土壤有机质与土壤理化性质、植被以及海拔联系不紧密。湿地土壤中的碳、氮、磷是影响湿地初级生产力的重要因素, 三者有着密切的相互耦合关系<sup>[55]</sup>。氮和磷是限制湿地植物生长的主要养分元素, 一方面, 氮磷通过影响植物的生长来影响土壤有机碳的输入和积累, 另一方面, 土壤的氮磷对土壤厌氧碳的分解也具有一定的调控作用<sup>[56]</sup>。本研究有机碳和总氮、总磷都存在着极显著的相关性( $p < 0.01$ ), 这与许多研究结果一致<sup>[57,58,59]</sup>。此外, 氮素对于有机碳的影响的空间分布(西高东低)与磷素差异也较大(东南部、西北部高, 中部低)。土壤的水分状况是影响湿地土壤有机碳关键因子之一。当土壤中水分含量较高时, 能够进入土壤中的氧气就比较少, 形成厌氧环境, 好氧微生物的活性就会减弱, 有机质分解慢, 从而促进有机碳积累; 而较低的土壤含水率可能会增加土壤中的氧气含量, 加速有机质的分解, 不利于有机碳的积累<sup>[60,61]</sup>。本研究中鄱阳湖各地区的土壤含水率的回归系数东北高, 西南低, 但是采样季节为丰水期, 全湖处于淹没状态, 含水率对有机碳的影响力的大小的空间差异较小。湿地植物地上与地下根系凋落物是湿地土壤有机碳的重要来源之一<sup>[62]</sup>, 而 NDVI 常用于反映植被覆盖的状况(生长状况、覆盖度等)<sup>[63]</sup>, 可以作为植被因素来研究其对土壤有机碳的影响。本研究中 NDVI 与有机碳在全湖尺度上的都呈现正相关性, 这与许多研究结果一致<sup>[64,65,66]</sup>。此外 NDVI 的回归系数值东部和南部高, 西北低, 表明 NDVI 对于土壤有机碳的影响在鄱阳湖的东部和南部较大, 在西部和北部较弱可能是因为鄱阳湖东部和南部的地势较高, 枯水期洲滩出露多, 植被大多分布在鄱阳湖的东部和南部<sup>[67]</sup>, 因而 NDVI 对有机碳的空间分布影响较强, 而从鄱阳湖冬季水陆分异图看出, 枯水期时鄱阳湖西部有着大面积的碟形湖分布, 北部又是入江通道, 水域面积比较大, 植被覆盖度低, 因此 NDVI 对于有机碳的影响较弱。高程高的区域不易被水淹没, 形成好氧环境, 有机质的分解较快, 有机碳难以积累<sup>[68]</sup>。本研

究中高程的回归系数值的绝对值自西北向东南递增,说明高程对于有机碳的影响在东部和南部较强,在西北部较弱。这是由于鄱阳湖东部和南部高程较高,洲滩出露早,干湿交替过程显著,不利于有机碳的积累,并且东南部高程的区域差异较大,因此对有机碳的空间分布影响较大。

碟形湖和洲滩的  $R^2$  值明显高于河道 ( $p < 0.01$ )。这表明碟形湖和洲滩中的总氮、总磷、含水率以及植被和海拔对于土壤有机碳分布的影响要强于河道。鄱阳湖北部河道的水流较快<sup>[60]</sup>,这会促进有机质的迁移,从而削弱了本区域的土壤、植被以及海拔对于土壤有机质的影响力,局部  $R^2$  值较低;而碟形湖和洲滩分布空间差异大,各环境因子间联系较为紧密,有机碳的输入和输出主要依赖于本地环境,所以有机碳的分布受土壤、植被以及海拔等因子的制约较大,局部  $R^2$  值较高。河道中总氮、总磷对于有机碳的影响力都高于碟形湖,可能是因为河道受到五大河来水、城镇生活污水的排放等外部的影响较大<sup>[69]</sup>,而碟形湖环境相对较为封闭,物质和能量循环较为稳定<sup>[70]</sup>,氮磷等营养元素对有机碳的影响较小。土壤含水率对于有机碳的影响在3种湿地类型中虽然有一个阶梯式分布,但由于采样是在丰水期进行的,各样本点都处于淹没状态,所以土壤含水率的影响差别不大。NDVI 系数反映的是地表植被覆盖的状况<sup>[63]</sup>,冬季鄱阳湖水陆分异大,洲滩出露早,植被生长状况较为良好,其对有机碳的影响较大;碟形湖虽然是水域,但因其较平缓的地形,也保留了较大的生物量<sup>[48]</sup>,NDVI 的影响力也较高;而河道处于水域,不适合地表植被生长,加上水流又比较快,所以表面很少有植被覆盖,NDVI 的影响力较小。本研究中高程对于土壤有机碳的影响在洲滩和碟形湖中较强,而在河道中较弱。海拔主要通过影响水位的高低来影响土壤理化性质、植被等进而影响土壤有机碳。研究表明,鄱阳湖植被群落沿高程呈现不规则的带状分异<sup>[71]</sup>。洲滩海拔变化差异较大,导致土壤性质、植被覆盖等差异显著,进而影响到有机碳的分布。碟形湖虽然地势较平坦,海拔变化小,但是其局部环境会随着海拔的细微变化而发生巨大变化<sup>[70]</sup>。河道水流较快,局部地势的变异系数,即相对海拔的影响可能比绝对海拔更重要。

## 4 结论

鄱阳湖湿地土壤有机碳含量平均值为 4.38%,高值出现在主湖区中部偏北以及南部湖湾区,北部入江通道有机碳含量最低;河口冲积洲滩和碟形湖的有机碳含量明显高于河道。总氮、总磷、含水率、海拔和 NDVI 解释了鄱阳湖湿地土壤有机碳 35.28% 的变化(整体  $R^2=0.35$ )。局部  $R^2$  值在湖区由东南向西北递减,碟形湖和洲滩的局部  $R^2$  值明显高于河道 ( $p < 0.01$ ),而碟形湖和洲滩之间差异不明显 ( $p > 0.05$ )。有机碳和总氮、总磷都存在着极显著的相关性 ( $p < 0.01$ ),总氮和有机碳的联系在湖区西强东弱,河道和洲滩强于碟形湖;总磷对有机碳的影响东南部和西北部均较强,中间区域较弱,河道中明显弱于洲滩和碟形湖;含水率对有机碳的影响在全湖尺度上的差异较小;NDVI 的影响从西北到东南逐渐增强,对于洲滩和碟形湖的影响明显强于河道;海拔对于有机碳的影响东南高,西北低,洲滩和碟形湖明显高于河道。

鄱阳湖具有重要的碳汇功能,但其碳存储能力存在明显的空间差异,主湖区中部偏北以及南部湖湾区、碟形湖等这些储碳能力较强的地区,应该给予重点保护。水位的异常波动如何影响鄱阳湖湿地的结构和功能,进而影响其碳汇功能,这将是以后的研究中值得加以深入研究或进一步探讨的问题。

### 参考文献:

[1]MACKAY A. Climate change 2007:Impacts,adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37: 2407-2407.

[2]CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON DR, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4): 1111.

[3]COLE J J, PRAIRIE Y T, CARACO N F, et al. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the

---

terrestrial carbon budget[J]. *Ecosystems*, 2007, 10(1):172-185.

[4] GRASSET C, RODRIGUEZ C, DELOLME C, et al. Can soil organic carbon fractions be used as functional indicators of wetlands?[J]. *Wetlands*, 2017, 37(6):1195-1205.

[5] GUDASZ C, BASTYIKEN D, STEGER K, et al. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments [J]. *Nature*, 2010, 466(7310):1134.

[6] ZHANG G L, BAI J H, MIN X, et al. Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66:458-466.

[7] HINSON A L, FEAGIN R A, ERIKSSON M, et al. The spatial distribution of soil organic carbon in tidal wetland soils of the continental United States[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(12):5468-5480.

[8] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081):165-173.

[9] ISE T, DUNN A L, WOFSY S C, et al. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(11):763-766.

[10] MCHERGUI C, BESAURY L, LANGLOIS E, et al. A comparison of permanent and fluctuating flooding on microbial properties in an ex-situ estuarine riparian system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 78:1-10.

[11] CHAPMAN E, CADILLO-QUIROZ H, CHILDERS D L, et al. Soil microbial community composition is correlated to soil carbon processing along a boreal wetland formation gradient[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 82:17-26.

[12] BOON P I, LEE K. Methane oxidation in sediments of a floodplain wetland in south-eastern Australia[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 1997, 25(2):138-142.

[13] LIU M, ZHANG Z J, HE Q, et al. Exogenous phosphorus inputs alter complexity of soil-dissolved organic carbon in agricultural riparian wetlands[J]. *Chemosphere*, 2014, 95:572-580.

[14] BOYE K, NOEL V, TFAILY M M, et al. Thermodynamically controlled preservation of organic carbon in floodplains[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(6):415-419.

[15] JIANG T, WANG D Y, WEI S Q, et al. Influences of the alternation of wet-dry periods on the variability of chromophoric dissolved organic matter in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636:249-259.

[16] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change:a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4):345-360.

[17] WILLIAMS L D, AHN C. Plant community development as affected by initial planting richness in created

---

mesocosm wetlands[J]. Ecological Engineering, 2015, 75:33-40.

[18]PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241):1009-1013.

[19]BILLS J S, JACINTHE P A, TEDESCO L P. Soil organic carbon pools and composition in a wetland complex invaded by reed canary grass[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(7):697-706.

[20]MEANS M M, AHN C, KOROL A R, et al. Carbon storage potential by four macrophytes as affected by planting diversity in a created wetland[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 165:133-139.

[21]TANGEN B A, BANSAL S. Soil organic carbon stocks and sequestration rates of inland, freshwater wetlands: Sources of variability and uncertainty[J]. Science of the Total Environment, 2020, 749:141444.

[22]MA K, ZHANG Y, TANG S X, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in the Zoige alpine wetland, northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Catena, 2016, 144:102-108.

[23]胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 鄱阳湖湿地植被退化原因分析及其预警[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3):381-386.

[24]ZHANG Q, WERNER A D. Hysteretic relationships in inundation dynamics for a large lake-floodplain system[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527:160-171.

[25]YOU H L, XU L G, LIU G L, et al. Effects of inter-annual water level fluctuations on vegetation evolution in typical wetlands of Poyang Lake, China[J]. Wetlands, 2015, 35(5):931-943.

[26]葛刚, 徐燕花, 赵磊, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6):619-622.

[27]WAN X L, HAN J Y, XU L G, et al. Soil characteristics in relation to vegetation communities in the wetlands of Poyang Lake, China[J]. Wetlands, 2014, 34(4):829-839.

[28]曹煦彬, 林娣, 蔡璐, 等. 鄱阳湖南矶山湿地不同植被类型对土壤碳组分、羧化酶及 cbb1 基因的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5):1269-1279.

[29]刘胜, 陈宇炜. 退水期鄱阳湖藁草(*Carex cinerascens*)和藜蒿(*Artemisia selengensis*)洲滩湿地 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因子[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6):1412-1420.

[30]沈瑞昌, 兰志春, 方长明, 等. “堃秋湖”围堤改变鄱阳湖洲滩湿地土壤碳循环过程[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5):1260-1270.

[31]王晓龙, 徐力刚, 白丽, 等. 鄱阳湖典型湿地植物群落土壤酶活性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4):798-803.

[32]王晓鸿. 山江湖工程创新技术与方法[M]. 科学出版社: 北京, 2009.

- 
- [33]ZHANG Z X, CHEN X, XU C Y, et al. Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522:510-521.
- [34]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 中国农业科技出版社: 北京, 2000.
- [35]BRULAND G L, RICHARDSON C J. Hydrologic gradients and topsoil additions affect soil properties of Virginia created wetlands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6):2069-2077.
- [36]崔天翔, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(4):1160-1171.
- [37]周在明, 杨燕明, 陈本清. 基于无人机遥感监测滩涂湿地入侵种互花米草植被覆盖度, [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12):3920-3926.
- [38]邢丽玮, 牛振国, 王华斌, 等. 基于优选特征及月合成 Landsat 数据湿地提取研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(3):80-86, 131.
- [39]旺罗. 江西都昌县建成鄱阳湖区最大网箱养殖基地[J]. *现代渔业信息*, 2011, 26:33.
- [40]刘景景. 基于碳氮稳定同位素的鄱阳湖网箱养殖区沉积物有机质来源研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [41]孔巧香, 李仁伟, 张宾, 等. 南美白对虾养殖水质理化因子的初步研究[J]. *环境化学*, 2012, 31(11):1823-1824.
- [42]蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 海水鱼类网箱养殖水域沉积物有机质的来源甄别[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(2):348-354.
- [43]皮坤, 张敏, 李庚辰, 等. 人工饵料对主养黄颡鱼和主养草鱼池塘沉降颗粒有机质贡献的同位素示踪[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(5):929-937.
- [44]黄新和, 杨祥学, 谢彼得, 等. 鄱阳湖滨都昌植被的研究[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 1963:171-190.
- [45]吴琴, 尧波, 幸瑞新, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤有机碳分布及影响因子[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2):313-318.
- [46]胡振鹏, 张祖芳, 刘以珍, 等. 碟形湖在鄱阳湖湿地生态系统的作用和意义[J]. *江西水利科技*, 2015, 41(5):317-323.
- [47]侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态[J]. *环境科学*, 2011, 32(1):290-297.
- [48]DICK D A, GILLIAM F S. Spatial heterogeneity and dependence of soils and herbaceous plant communities in adjacent seasonal wetland and pasture sites[J]. *Wetlands*, 2007, 27(4):951-963.
- [49]PHILIPPOT L, HALLIN S, BORJESSON G, et al. Biochemical cycling in the rhizosphere having an impact on global change[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1-2):61-81.

- 
- [50]齐凌艳, 黄佳聪, 高俊峰, 等. 鄱阳湖枯水水位及流速时空分布模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4):572-584.
- [51]PEREZ-ROJAS J, MORENO F, QUEVEDO J C, et al. Soil organic carbon stocks in fluvial and isolated tropical wetlands from Colombia[J]. CATENA, 2019, 179:139-148.
- [52]WANG X L, XU L G, WAN R R. Comparison on soil organic carbon within two typical wetland areas along the vegetation gradient of Poyang Lake, China[J]. Hydrology Research, 2016, 47:261-277.
- [53]YANG M S. The biological sources of the organic matter in Poyang Lake sediments[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2479:431-436.
- [54]LI B, YANG G S, WAN R R, et al. Spatiotemporal variability in the water quality of Poyang Lake and its associated responses to hydrological conditions[J]. Water, 2016, 8(7):296.
- [55]罗先香, 敦萌, 闫琴. 黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5):154-160.
- [56]王维奇, 全川, 曾从盛. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征[J]. 中国环境科学, 2010, 30(10):1369-1374.
- [57]董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(6):1594-1599.
- [58]徐欢欢, 曾从盛, 王维奇, 等. 艾比湖湿地土壤有机碳垂直分布特征及其影响因子分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2010, 26(5):86-91.
- [59]邵学新, 杨文英, 吴明, 等. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3):658-664.
- [60]SAHRAWAT K L. Organic matter accumulation in submerged soils[J]. Advances in Agronomy, 2003, 81:169-201.
- [61]GRIMM K, NASAB M T, Chu X F. TWI computations and topographic analysis of depression-dominated surfaces[J]. Water, 2018, 10(5):663.
- [62]赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 等. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 地理科学, 2013, 33(3):363-370.
- [63]白建军, 白江涛, 王磊. 2000~2010年陕北地区植被NDVI时空变化及其与区域气候的关系[J]. 地理科学, 2014, 34(7):882-888.
- [64]姜俊彦, 黄星, 李秀珍, 等. 潮滩湿地土壤有机碳储量及其与土壤理化因子的关系——以崇明东滩为例[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4):540-547.
- [65]赵忠贺, 刘高焕, 徐增让. 2001-2010年西藏生态系统碳蓄积量数据集[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2018, 2(1):67-71, 198-202.

---

[66] 李理, 朱文博, 刘俊杰, 等. 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 687-695.

[67] 韩杏杏. 基于长时序光学遥感数据的鄱阳湖湿地景观格局时空动态研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[68] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 尕斯库勒湖湿地沼泽化草甸中不同积水区土壤活性有机碳含量[J]. 湿地科学, 2017, 15(1): 137-143.

[69] 徐夏楠, 高建华, 贾建军, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域入湖输沙量影响的定量估算[J]. 地理研究, 2015, 34(5): 838-850.

[70] 李海辉. 鄱阳湖主湖区与碟形湖水位变化及其对水质的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1298-1306.

[71] 谭志强, 张奇, 李云良, 等. 鄱阳湖湿地典型植物群落沿高程分布特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(4): 506-515.