

于玲红, 王铭浩, 李卫平, 等. 包头南海湖沉积物有机碳空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 538–545.

YU Ling-hong, WANG Ming-hao, LI Wei-ping, et al. Spatial distribution characteristics of the organic carbon insediments of Nanhai Lake in Baotou City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 538–545.

包头南海湖沉积物有机碳空间分布特征

于玲红¹, 王铭浩¹, 李卫平^{1*}, 杨文焕¹, 樊爱萍², 苗春林³

(1.内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010; 2.包头市生态湿地保护管理中心, 内蒙古 包头 014010; 3.包头南海子湿地保护区管理处, 内蒙古 包头 014040)

摘要: 为了解包头南海湿地的有机碳分布特点及碳库稳定性, 以南海湖沉积物有机碳为研究对象, 利用活性有机碳及其占总有机碳比例, 分析其空间分布特征及碳库稳定性。结果表明: 有机碳含量在垂向总体呈现随沉积物深度增加而降低的趋势, 总有机碳含量在 $3.96\sim 28.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $13.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 活性有机碳含量在 $1.16\sim 16.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $6.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 活性有机碳含量占总有机碳含量的 $34.19\%\sim 54.64\%$ 。变异系数均在 $10\%\sim 100\%$ 之间, 属中等变异, $0\sim 10\text{ cm}$ 层、 $10\sim 20\text{ cm}$ 层沉积物中有机碳含量峰值集中在 $0\sim 10\text{ cm}$ 层, 在 $8.91\sim 28.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $16.52\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 活性有机碳含量整体所占比例较大, 有机碳易受到干扰, 碳库稳定性较低, 但整体以惰性有机碳含量为主, 亦属稳定碳库; 水平分布总体呈现从湖心向四周递减的规律, 但进水口和芦苇区的有机碳含量较高, 活性有机碳以湖心为最高, 总有机碳含量越高, 活性有机碳含量也越高, 湖心小岛处活性有机碳占总有机碳含量的 44.16% , 湖心处为 43.47% , 但芦苇区总有机碳含量最高, 而活性有机碳含量却较低, 活性有机碳含量占总有机碳含量的 39.78% , 以稳定的惰性有机碳为主, 属稳定碳库, 表明芦苇对碳库稳定较为有利。研究表明, 沉积物碳库稳定性受芦苇区和人为活动影响, 随着沉积物深度的增加碳库稳定性增强。

关键词: 南海湿地; 沉积物; 有机碳; 空间分布

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)03-0538-08 doi:10.11654/jaes.2017-1057

Spatial distribution characteristics of the organic carbon insediments of Nanhai Lake in Baotou City

YU Ling-hong¹, WANG Ming-hao¹, LI Wei-ping^{1*}, YANG Wen-huan¹, FAN Ai-ping², MIAO Chun-lin³

(1.School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2.Baotou City Ecological Wetland Protection and Management Center, Baotou 014010, China; 3.Baotou Nanhai Lake Wetland Reserve Management Office, Baotou 014040, China)

Abstract: As one of the important carbon pools in the ecosystem, lake organic carbon pools are major carbon reserves for atmospheric CO_2 . Their stability is of great significance to the entire ecosystem. This essay considered the organic carbon of Nanhai Lake sediments as the research object, analyzing its spatial distribution characteristics and stability, based on the ratio of active organic carbon to total organic carbon. The results showed that the organic carbon content decreased vertically along with the increase in sediment depth, while the total organic carbon varied between 3.96 and $28.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average of $13.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The active organic carbon ranged from 1.16 to $16.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average of $6.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Thus, the active organic carbon ranged from 34.19 to 54.64 percent of the total organic carbon. Its coefficient of variation, between 10 and 100 percent, appeared moderately variable. The organic carbon content varied between 8.91 and $28.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average of $16.52\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, peaking at a depth of 0 to 10 cm . Meanwhile, the active organic carbon occupied a large proportion of the total. As a result, its susceptibility to interference contributed to the poor stability of the carbon pool. However, due to the inertness of

收稿日期: 2017-08-01 录用日期: 2017-11-15

作者简介: 于玲红(1967—), 女, 河北沧州人, 博士, 教授, 主要从事水处理和水污染控制研究。E-mail: ylh0730@163.com

* 通信作者: 李卫平 E-mail: sjlwp@163.com

基金项目: 内蒙古包头黄河湿地生态系统国家定位观测研究站运行补助(2015-LYPT-DW-037); 国家自然科学基金项目(41263010)

Project supported: Inner Mongolia Baotou Yellow River Wetland Ecosystem National Positioning Observation Station Operation Subsidy (2015-LYPT-DW-037); National Natural Science Foundation of China(41263010)

the organic carbon in general, the entire carbon pool seemed stable. The results also demonstrated that the organic carbon content decreased horizontally along the radius of the lake, with the maximum being at the center of the lake, along with a high content in the influent and ditch reed areas. The higher the total organic carbon, the higher the active organic carbon. The active organic carbon accounted for 44.16 percent of the total on the central island, with 43.47 percent at the lake center. The total organic carbon reached the maximum in ditch reed areas, where a significantly lower content of active organic carbon, at 39.78 percent, was detected. In the same way, the inert organic carbon occupied a large proportion, with the carbon pool appearing stable. To sum up, the stability of the sediment carbon pools can be affected by ditch reed areas and human activities, with an increase in the sediment depth corresponding to an increase in their stability.

Keywords: Nanhai wetlands; sediments; organic carbon; spatial distribution

湖泊被认为是一种特殊的自然综合体,与土壤圈、生物圈、大气圈等密切相关,是地表水载体赋存的最好场所^[1-2]。湖泊对环境变化极其敏感,一直被当作研究全球环境变化的典型区域,特别是内陆湖泊一直被认为是湖区气候变化和环境变异的指示器^[3-4]。湖泊有机碳库是生态系统中重要的碳库之一^[5],湖泊碳循环又是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,在全球碳循环中起到非常重要的作用^[6-7]。近几十年来,全球气候变化日益加剧,湖泊有机碳库作为大气 CO₂ 的重要碳汇^[8],在稳定全球气候变化中的贡献愈发受到重视^[9],因此研究湖泊碳库的稳定性对稳定生态系统及全球气候变化有着重要意义。活性有机碳有效性较高,易被微生物分解利用部分有机质^[10-11],易受到外界干扰,不利于碳库的稳定;惰性有机碳的生物活性相对较低,很难被微生物利用,为稳定碳库。赵海超等^[12]研究发现,洱海表层沉积物有机质中活性有机质占总有机质含量的 10.80%~46.97%,主要受水生植物、人类活动及水体深度的影响,有机碳活性较高;易文利等^[13]研究发现,活性有机质含量占总有机质含量的 19.62%~31.86%,并得出污染严重的城市湖泊沉积物中活性有机质含量较高的结论。

沉积物中的有机碳是湖泊中碳的重要来源^[14],近年来关于湖泊沉积物有机碳的研究逐渐增多,但大都集中在洞庭湖、巢湖、洱海等一些较大的湖泊^[12,15-18],对于内蒙古地区研究较多的是乌梁素海^[19-21]。包头南海湿地作为内蒙古重要湿地之一,2006年,南海湿地自然保护区被列入国家湿地保护工程规划的重点保护名录。南海湖作为南海湿地的核心区域,不仅可以为城市居民提供必要的水资源,还具有为城市提供蓄水、防御自然灾害、补充地下水源、降解有毒物质、净化空气、调节小气候、吸附粉尘、净化污水、美化环境等服务功能,因此对于南海湖的生态研究愈发重要并且迫在眉睫。基于上述情况,本文通过对总有机碳的研究并引入活性有机碳和惰性有机碳两个指标,以包

头南海湿地南海湖为研究对象,对其沉积物有机碳空间分布特征进行分析,了解其有机碳分布特点及碳库稳定性,以期对南海湖资源的合理开发与利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

包头南海湿地(40°30'8"N~40°33'32"N, 109°59'2"E~110°2'26"E)北靠包头市,南邻黄河^[22],因特殊的地理位置、气候特征和水文地质条件,使其成为高纬度寒旱区独特的河流湿地生态系统^[23]。该区气候属于半干旱中温带大陆性季风气候,保护区内的地表水主要来源于黄河水,其次为地下水和大气降水。南海湖是黄河河段南移后留下的河迹湖,湖面约 333 hm²,东西长 3.5 km,南北宽 1.2 km,湖深 0.9~3.5 m。

1.2 样品采集

2017年1月通过GPS定位,对南海湖进行200 m×200 m的空间网格剖分,利用网格交点进行梅花布点,并在出水口、进水口及湖中芦苇区增设点位。冬季湖区部分点位冰层较薄,无法取样,故只取湖中20个点位,采样点分布图如图1所示(NH1位于进水口, NH3、NH18位于芦苇区, NH6位于排污口, NH8位于湖心小岛, NH9位于旅游船区, NH10为湖心)。取样时分别用彼得逊抓斗式表层沉积物采泥器采集南海湖表层(0~10 cm)沉积物样品,重力式沉积物采泥器采集南海湖底层(10~20、20~30、30~40、40~50 cm)沉积物样品。取样后现场以10 cm间隔分层,沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室后自然风干,磨细过100目筛,用四分法取其中一部分,保存待测。

1.3 实验方法

有机碳总量采用重铬酸钾氧化法-硫酸外加热法测定^[24],活性有机碳含量采用333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法测定^[25-27],惰性有机碳取总有机碳与活性有机碳平均值的差值^[28]。

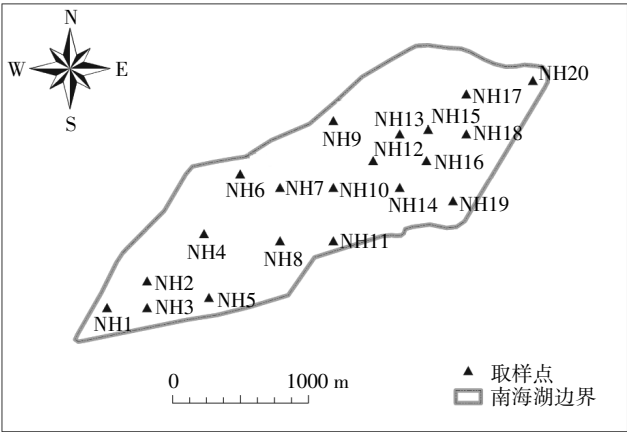


图 1 南海湖采样点分布图

Figure 1 Locations of sampling plots in Nanhai Lake

1.4 数据讨论

采用 Excel 2003 对实验数据进行初步整理,SPSS 21.0 软件对整理的数据进行分析,采用 Origin 9 进行绘图,空间插值制图采用 ArcGIS 10.2 软件。

2 结果与讨论

2.1 南海湖沉积物有机碳的垂直分布特征

2.1.1 沉积物有机碳垂直分布

由于南海湖底泥厚度不同,各采样点沉积物采集深度不能都取到 50 cm,挑选特殊分布区域的 8 个点(NH1、NH2、NH3、NH8、NH10、NH11、NH14 和 NH18)着重分析其垂直分布。NH1 位于进水口、NH3 和 NH18 位于芦苇区、NH8 位于湖心小岛、NH10 为湖心、NH2 和 NH14 分别位于进水口和芦苇区附近。

南海湖总有机碳和活性有机碳含量见表 1。由表 1 可知,活性有机碳含量为 1.16~16.47 g·kg⁻¹,平均值为 6.12 g·kg⁻¹,总有机碳含量为 3.96~28.35 g·kg⁻¹,平均值为 13.11 g·kg⁻¹,活性有机碳含量占总有机碳含量的 34.19%~54.64%。赵海超等^[12]研究表明,洱海表层沉积物中活性有机碳含量占总有机碳的 10.80%~46.97%,可见,南海湖沉积物中活性有机碳含量整体

所占比例较大,碳库稳定性不高。毛海芳等^[19]研究表明,乌梁素海沉积物中总有机碳含量为 4.50~22.83 g·kg⁻¹,平均值为 11.80 g·kg⁻¹;活性有机碳含量平均值为 2.11 g·kg⁻¹,岱海沉积物中总有机碳含量为 6.84~23.46 g·kg⁻¹,平均值为 14.94 g·kg⁻¹,活性有机碳含量平均值为 3.62 g·kg⁻¹,可见南海湖沉积物中总有机碳含量与乌梁素海和岱海相比相差不大,但活性有机碳含量却比乌梁素海高约 2 倍,比岱海高约 70%。因此南海湖沉积物有机碳活性较强,相比而言,南海湖沉积物碳库稳定性偏低,但由表 1 可以看出随着深度的增加,南海湖沉积物有机碳库越来越趋于稳定。

南海湖有机碳含量标准方差和变异系数见表 2。由表 2 得知,南海湖整体变异系数较高,活性有机碳含量变异系数最高,为不稳定碳类型。根据变异系数(CV)对空间变异性进行划分^[20]:CV<10%为弱变异性,10%~100%为中等变异性,CV>100%为强变异性。据此说明,南海湖沉积物有机碳属于中等变异性。

南海湖 8 个采样点总有机碳、活性有机碳和惰性有机碳的整体垂直分布如图 2 所示。由表 1 和图 2 可知,南海湖有机碳含量整体随沉积物深度增加而减小。符合一般沉积物的自然沉积规律,具有明显的“沉降-降解-堆积”三个阶段,在沉降阶段,有机碳的分解速度可视为零,或者降解作用很微弱;降解阶段,在一定深度域中,沉积物有机碳发生明显的氧化作用,有机碳的增加明显小于有机碳的分解量,所以在垂向分布上呈现出衰减的特征;堆积阶段,该阶段在降解域以下,有机碳处于聚集状态,此阶段有机碳分解缓慢且分解难度增加,处于含量稳定的状态^[20]。随着深度的增加,底层沉积物受到的各类污染较少,活性有机碳的含量比例逐渐降低,整体以惰性有机碳为主,碳库相对较为稳定。南海湖为旅游之地,易受到游客影响,不同位置有机碳含量差异较大且沉积物有机碳含量形成明显的断层(20 cm 处为断层分界处),20 cm 以上沉积物中有机碳处于沉降阶段,外界干扰和芦苇

表 1 总有机碳和活性有机碳含量
Table 1 Total organic carbon and active organic carbon content

深度/cm	总有机碳/g·kg ⁻¹			活性有机碳/g·kg ⁻¹		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
0~10	18.68	28.35	23.36	9.62	16.47	12.76
10~20	13.26	22.06	17.16	5.66	11.36	8.16
20~30	9.62	13.95	11.37	3.61	6.17	4.67
30~40	7.89	10.73	9.16	2.49	4.46	3.47
40~50	3.96	5.32	4.48	1.16	1.99	1.53

表 2 有机碳含量标准偏差和变异系数
Table 2 Organic carbon content standard variance and coefficient of variation

深度/cm	总有机碳		活性有机碳		惰性有机碳	
	标准偏差/g·kg ⁻¹	变异系数/%	标准偏差/g·kg ⁻¹	变异系数/%	标准偏差/g·kg ⁻¹	变异系数/%
0~10	3.906 29	16.72	2.853 05	22.35	1.172 85	11.20
10~20	2.897 90	16.89	1.865 25	22.87	1.080 04	12.00
20~30	1.502 66	13.22	0.874 32	18.70	0.769 56	11.49
30~40	1.121 98	12.24	0.705 59	20.32	0.531 34	9.54
40~50	0.546 27	12.18	0.324 02	21.14	0.253 37	8.59

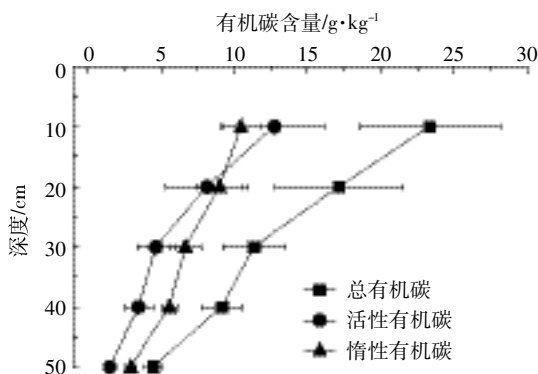


图 2 南海湖有机碳含量随深度的变化
Figure 2 Changes of organic carbon in Nanhai Lake with sediment depth

区根系固碳作用使得该区域有机碳含量较高,20 cm 以下沉积物受到干扰减少,且随着有机碳的降解,有机碳含量逐渐降低,慢慢趋于堆积阶段,有机碳含量趋于稳定。

南海湖各采样点沉积物有机碳含量垂直变化详见图 3。由图 3 可以看出:NH1 和 NH8 比较特殊,其他点位基本类似。NH1 点在 10~20 cm 层有机碳含量大于 0~10 cm 层,因为 NH1 点处于进水口位置,水体携带的有机碳随着进水而进入湖泊,由于水体冲刷,0~10 cm 层的有机碳一部分流向其他位置,还有一部分则滞留并沉向下层,使得 10~20 cm 层的有机碳含量增加而大于 0~10 cm 层。之后,活性有机碳含量减少,惰性有机碳含量增加,碳库趋向于稳定。NH8 位于湖中心旅游小岛处附近,岛内养殖的动物的粪便和游客扔弃的垃圾等会使 0~10 cm 层有机碳含量增加而远大于 10~20 cm 层,之后有机碳含量呈稳定下降趋势。

由上述各点有机碳含量分布图可以看出,0~10 cm 层、10~20 cm 层沉积物有机碳含量变化较大,因此进一步分析表层沉积物垂直分布。

2.1.2 0~10 cm 层、10~20 cm 层沉积物有机碳的垂直分布

南海湖 0~10 cm 层、10~20 cm 层沉积物有机碳垂直分布详见图 4。0~10 cm 层、10~20 cm 层沉积物有机碳的峰值主要集中在 0~10 cm 层。由图 4 可知,南海湖 0~10 cm 层、10~20 cm 层沉积物中有机碳含量在 8.91~28.35 g·kg⁻¹ 之间,平均值为 16.52 g·kg⁻¹。0~10 cm 层变异系数为 0.30,10~20 cm 层变异系数为 0.12,均属于中等变异,该层整体碳库稳定性不高,易受到各类影响因素干扰。但 10~20 cm 层明显比 0~10 cm 层的变异系数小很多,与 0~10 cm 层相比,10~20 cm 层的有机碳含量整体趋同,碳库也更为稳定。

2.2 南海湖沉积物有机碳的水平分布特征

2.2.1 南海湖各分层沉积物有机碳的水平分布

各层沉积物有机碳水平分布详见图 5,其中 40~50 cm 层含量分布图只有 8 个点位(NH1、NH2、NH3、NH8、NH10、NH11、NH14 和 NH18)的数据。由图 5 可见,有机碳含量水平分布大致呈现从湖心向四周递减的趋势,但个别点位有机碳含量较为特殊。如旅游区(NH8 处为湖心小岛附近、NH9 为旅游船区)受人为影响较多,NH8 处受到各类污染(人为污染、岛上养殖动物、游船等)较为严重,造成有机碳含量较高,而 NH9 处仅有旅游船(冬天游客较少且结冰后船只无法行驶),相对于 NH8 污染较少,有机碳含量相对较小;芦苇区(NH3、NH18)由于植物根系吸收营养元素,具有明显的固碳作用,并且在冬季冰封期,芦苇的枯枝腐烂会造成营养物质增加,使有机碳的含量增高^[30];雷泽湘等^[31]研究表明,有草区的沉积物中有机质含量高于无草区,通过本文研究也印证了其研究。由排污口(NH6 靠近排污口)进入湖体的污染物过多,污染物中各类指标都比较高,导致该处有机碳含量随着污染物的排入而增加;出水口(NH20)处随着水体流动,各类营养物质会随着水体流动向出水口附近移动,致使该处有机碳含量较高,但在 0~10 cm 层有机碳含量小于 10~20 cm 层,因为随着水体冲刷,0~10 cm 层沉积物中有机碳会随着水体流动而流出南

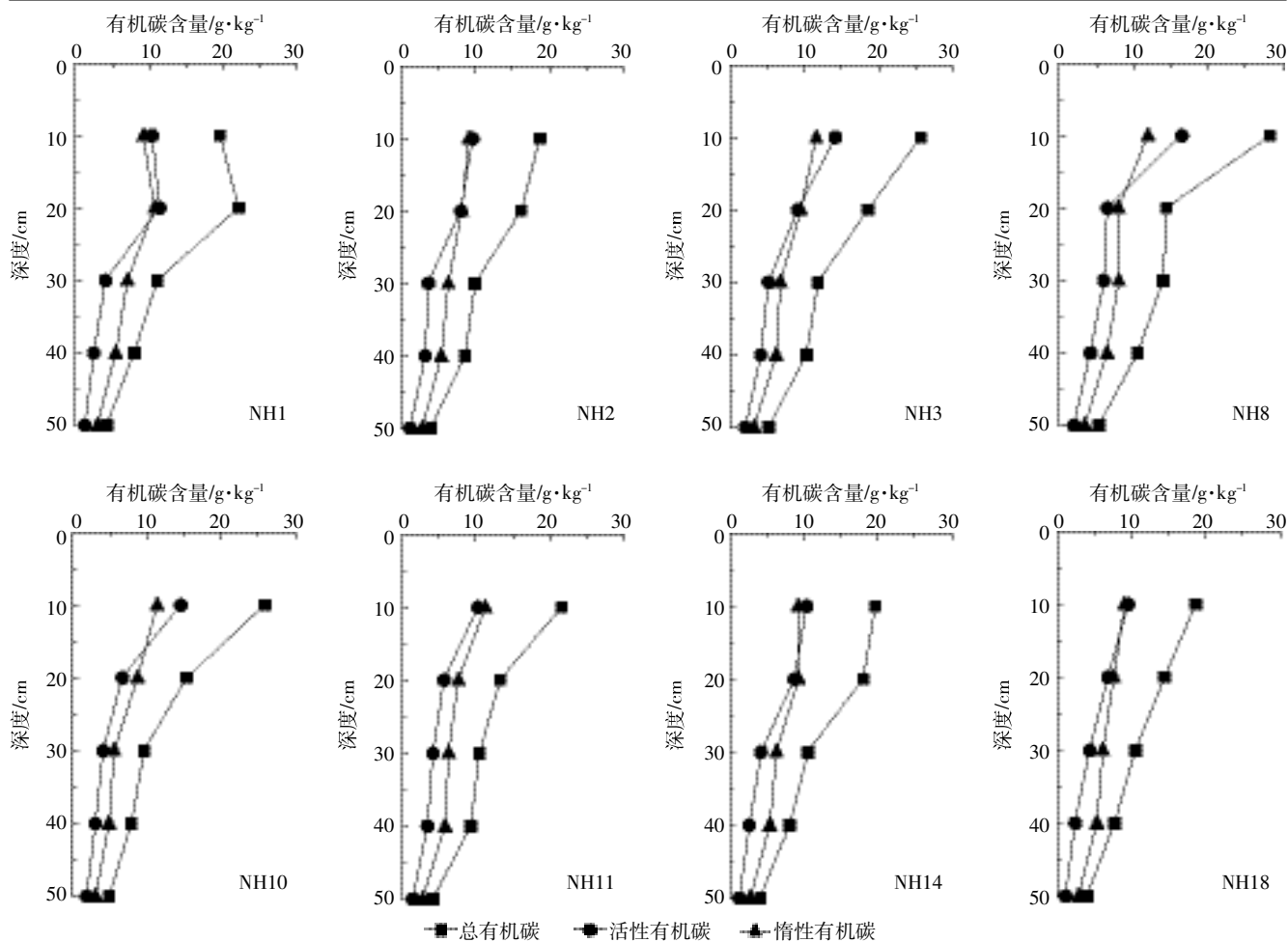


图 3 南海湖各采样点有机碳含量随深度的变化

Figure 3 The change of organic carbon content in eight sampling points of Nanhai Lake with sediment depth

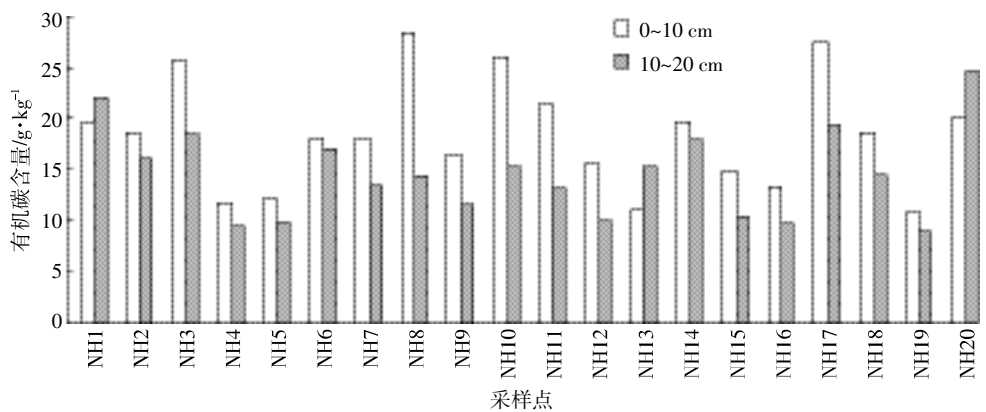


图 4 南海湖表层沉积物有机碳含量变化

Figure 4 Changes of organic carbon in surface sediments of Nanhai Lake

海湖,而部分有机碳会沉淀下来,造成 10~20 cm 层的有机碳含量有所增加。

南海湖活性有机碳水平分布如图 6 所示。因 30~40 cm、40~50 cm 取样点数据不全且数据太小,故没

有分析该两层数据图。由图 6 可知 0~10 cm 层活性有机碳含量分布差异较大,湖中心含量较大,NH8(湖心小岛)处受岛上养殖动物和人类活动影响较大,有机碳活性较高;10~20 cm 层 NH6 点位数据较大,因该点

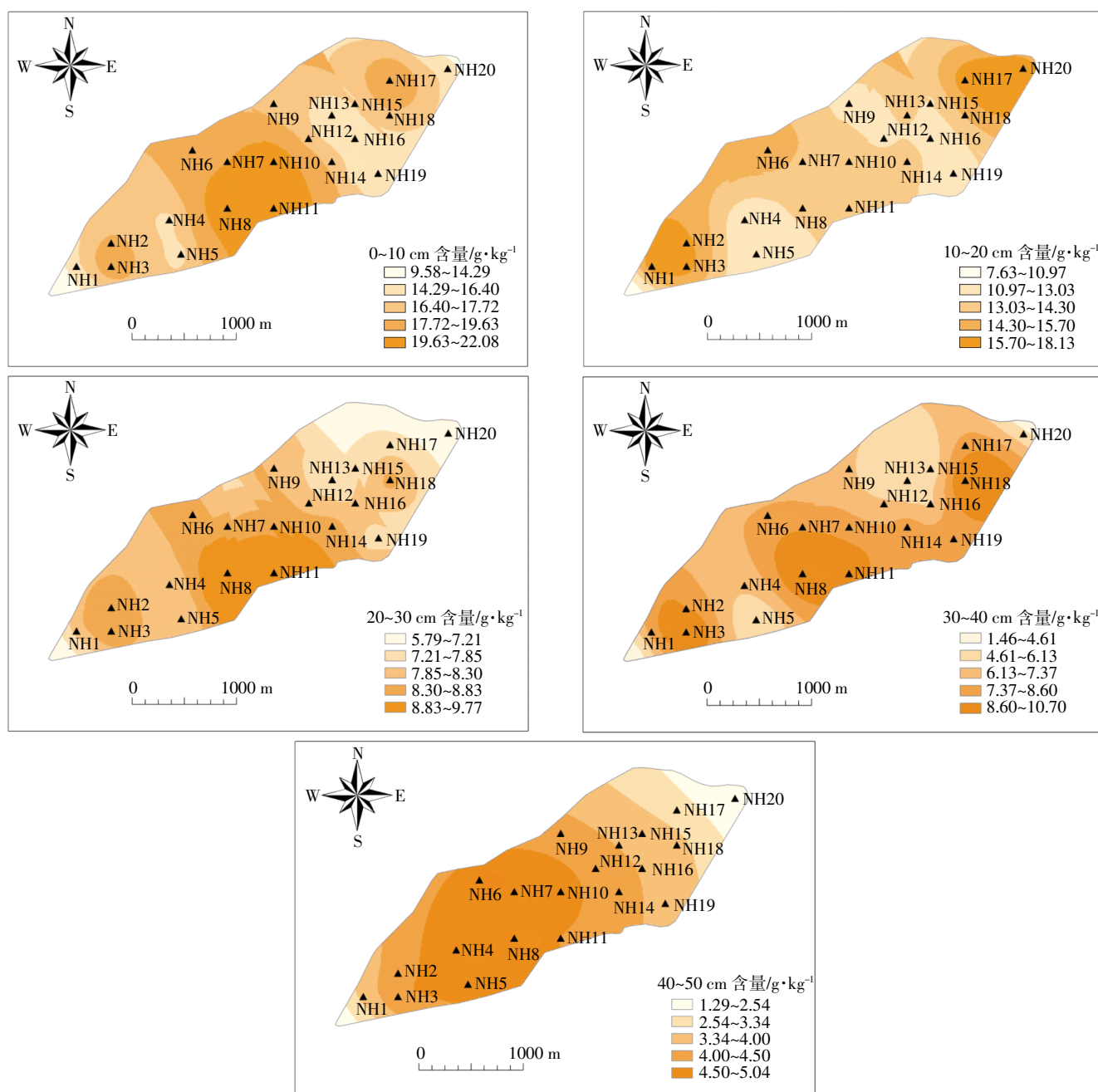


图5 南海湖各分层沉积物有机碳含量水平分布

Figure 5 Horizontal distribution of organic carbon in sediments of Nanhai Lake

位于排污口附近,0~10 cm 层含量亦不低,10~20 cm 层含量也稍大于其他点位,排污口进入湖体的污染物携带有机碳含量较大,造成该处有机碳活性较高。不同层中 NH3、NH18(芦苇区)活性有机碳含量都大于其他点位,而 NH3 处又靠近进水口附近,其活性有机碳含量要高于 NH18 处,说明芦苇对有机碳的吸收不仅使附近有机碳含量较高,活性有机碳含量也较高。

对比图 5 和图 6 可知,总有机碳含量越高,活性有机碳含量也越高,NH8(湖心小岛)处活性有机碳占

总有机碳含量的 44.16%,NH10(湖心)处为 43.47%。但芦苇区总有机碳含量最高,而活性有机碳含量却较低,活性有机碳含量占总有机碳含量的 39.78%,这主要是因为芦苇根系吸收营养元素,具有固碳作用,芦苇区以稳定的惰性有机碳为主,属稳定碳库,说明芦苇对碳库稳定较为有利。

3 结论

(1)有机碳含量在垂向总体呈现随沉积物采集深

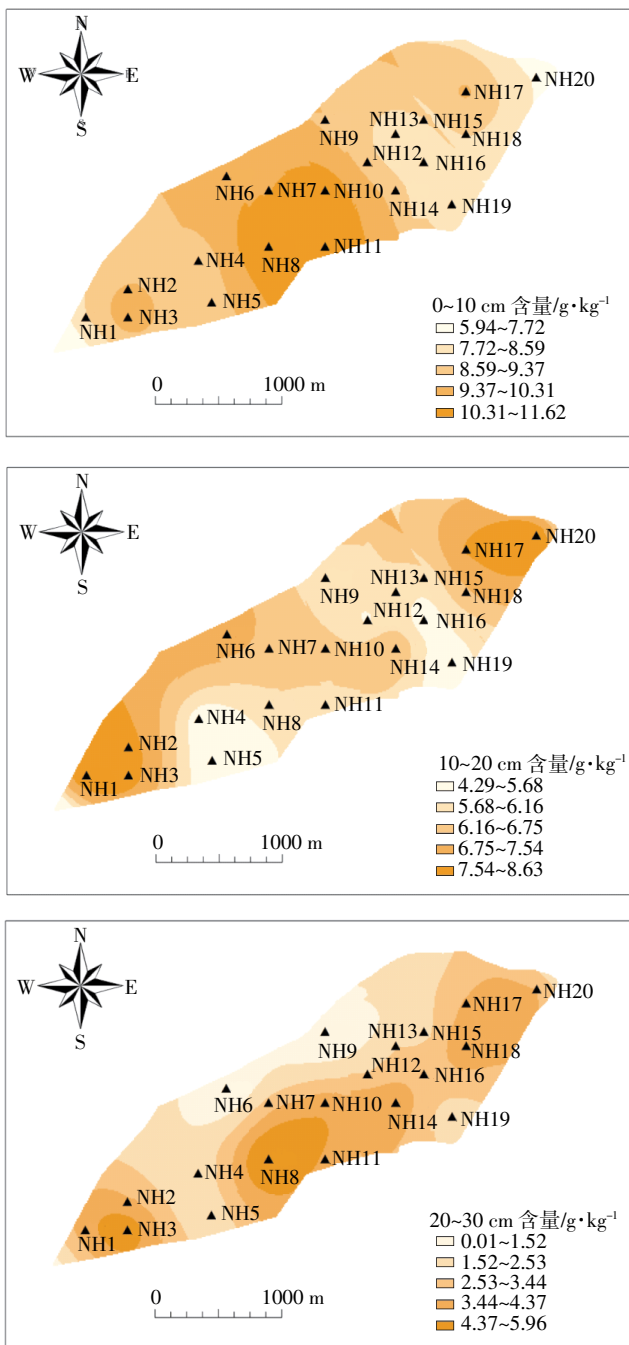


图6 南海湖沉积物活性有机碳含量水平分布

Figure 6 Horizontal distribution of active organic carbon in sediments of Nanhai Lake

度的增加而降低的趋势。0~10 cm层、10~20 cm层沉积物中有机碳易受到干扰,各点位之间有机碳含量差距较大,碳库稳定性不高,20 cm以下以惰性有机碳为主,属稳定的碳库。可见,南海湖沉积物碳库稳定性受人为活动影响较大,随沉积物深度增加碳库稳定性增强。

(2)有机碳含量在水平方向总体呈现从湖心到四

周逐渐减小的规律,但进水口和芦苇区的有机碳含量较高,活性有机碳在湖心区较高。总有机碳含量越高的点位,活性有机碳所占的比例也越高,碳库呈不稳定性。但芦苇区属稳定碳库,可见芦苇对碳库稳定性和碳汇具有重要作用。

参考文献:

- [1] 于革,薛滨,刘健,等.中国湖泊演变与古气候动力学研究[M].北京:气象出版社,1989:1-16.
YU Ge, XUE Bin, LIU Jian, et al. Evolution of Chinese lakes and paleo-climatic kinetics[M]. Beijing: Meteorological Press, 1989: 1-16.
- [2] 王苏民.湖泊沉积的信息原理与研究趋势[M]//张兰生.中国生存环境历史演变规律研究.北京:海洋出版社,1993,22-31.
WANG Su-min. Information principle and research trend of lake sedimentation[M]//ZHANG Lan-sheng. Study on the historical evolution of Chinese survival environment. Beijing: Ocean Press, 1993, 22-31.
- [3] 濮培民,屠清瑛,王苏民.中国湖泊学研究进展[J].湖泊科学,1989,1(1):1-11.
PU Pei-min, TU Qing-ying, WANG Su-min. Research progress of Chinese lake[J]. *Journal of Lake Science*, 1989, 1(1): 1-11.
- [4] 孙惠民.乌梁素海富营养化及其机制研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2006.
SUN Hui-min. Study on eutrophication of Wuliangsuhai Lake and its mechanism[D]. Hohhot: Mongolian University, 2006.
- [5] 马维伟,王辉,黄蓉,等.尕斯库勒湖湿地生态系统土壤有机碳储量和碳密度分布[J].应用生态学报,2014,25(3):738-744.
MA Wei-wei, WANG Hui, HUANG Rong, et al. Soil organic carbon storage and carbon density distribution in Gahai wetland ecosystem[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 738-744.
- [6] Waddington J M, Griffis T J, Rouse W R. Northern Canadian wetlands: Net ecosystem CO₂ exchange and climatic change[J]. *Climate Change*, 1998, 40(2): 267-275.
- [7] Frolking S, Roullet N T, Moore T R, et al. Modeling northern peatland decomposition and peat accumulation[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 479-498.
- [8] Koehler A K, Sottocornola M, Kiely G. How strong is the current carbon sequestration of an Atlantic blanket bog[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 309-319.
- [9] 栾军伟,崔丽娟,宋洪涛,等.国外湿地生态系统碳循环研究进展[J].湿地科学,2012,10(2):235-242.
LUAN Jun-wei, CUI Li-juan, SONG Hong-tao, et al. Research progress on carbon cycle of wetland ecosystem in foreign countries[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(2): 235-242.
- [10] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466.
- [11] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society America Journal*, 1992, 56: 1799-1806.

- [12] 赵海超,王圣瑞,焦立新,等.洱海沉积物有机质及其组分空间分布特征[J].环境科学研究,2013,26(3):243-249.
ZHAO Hai-chao, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, et al. Spatial distribution characteristics of organic matter and its components in sediments of Erhai Lake[J]. *Environmental Science Research*, 2013, 26(3): 243-249.
- [13] 易文利,王圣瑞,金相灿,等.长江中下游浅水湖沉积物中有机质及其组分的赋存特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(5):141-148.
YI Wen-li, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, et al. Occurrence characteristics of organic matter and its components in sediments of shallow lake in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2008, 36(5): 141-148.
- [14] 程庆霖.高原湖泊沉积物有机碳、氮来源与表征[D].上海:华东师范大学,2014.
CHENG Qing-lin. Organic carbon, nitrogen sources and characterization of sediments in plateau lakes[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [15] 张文菊,彭佩钦,童成立,等.洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J].环境科学,2005,26(3):56-60.
ZHANG Wen-ju, PENG Pei-qin, TONG Cheng-li, et al. Vertical distribution and composition of organic carbon in Dongting Lake wetland[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 56-60.
- [16] 刘清玉,戴雪荣,王立群.巢湖沉积物有机碳分布变化特征[J].上海国土资源,2008(1):13-17.
LIU Qing-yu, DAI Xue-rong, WANG Li-qun. Characteristics of organic carbon distribution in sediments of Chaohu Lake[J]. *Shanghai Land and Resources*, 2008(1): 13-17.
- [17] 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等.太湖沉积物有机碳与氮的来源[J].生态学报,2011,31(16):4661-4670.
NI Zhao-kui, LI Yue-jin, WANG Sheng-rui, et al. The source of organic carbon and nitrogen in Taihu Lake sediments[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 31(16): 4661-4670.
- [18] 王毛兰,赖建平,胡珂珂,等.鄱阳湖表层沉积物有机碳、氮同位素特征及其来源分析[J].中国环境科学,2014,34(4):1019-1025.
WANG Mao-lan, LAI Jian-ping, HU Ke-tu, et al. Analysis of organic carbon and nitrogen isotopic characteristics of surface sediments in Poyang Lake and its source analysis[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(4): 1019-1025.
- [19] 毛海芳,何江,吕昌伟,等.乌梁素海和岱海沉积物有机碳的形态特征[J].环境科学,2011,32(3):658-666.
MAO Hai-fang, HE Jiang, LÜ Chang-wei, et al. Morphological characteristics of organic carbon in sediments of Wuliangsu Hai and Daihai Rivers[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3): 658-666.
- [20] 付绪金.乌梁素海沉积物有机碳特征及碳储量研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
FU Xu-jin. Study on organic carbon and carbon storage of Wuliangsu Hai sediment[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [21] 田志强,李畅游,史小红,等.乌梁素海沉积物中有机碳的空间分布与储量特征[J].节水灌溉,2011(3):23-25.
TIAN Zhi-qiang, LI Chang-you, SHI Xiao-hong, et al. Spatial distribution and storage characteristics of organic carbon in sediments of Wuliangsu Hai Lake[J]. *Water Saving Irrigation*, 2011(3): 23-25.
- [22] 高静洁,王晓云,李卫平,等.包头南海湿地生态系统健康评价[J].湿地科学,2017,15(2):207-213.
GAO Jing-tian, WANG Xiao-yun, LI Wei-ping, et al. Health evaluation of Baotou Nanhai wetland ecosystem[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(2): 207-213.
- [23] 于玲红,王晓云,李卫平,等.包头南海湿地冰封期水质特征[J].湿地科学,2016,14(6):810-815.
YU Ling-hong, WANG Xiao-yun, LI Wei-ping, et al. Characteristics of water quality in Baotou Nanhai wetland[J]. *Wetland Science*, 2016, 14(6): 810-815.
- [24] 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,1978.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [25] Lognini W, Wisniewski W, Strony W M, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47-52.
- [26] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M, et al. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. *Plant Soil*, 1993, 155/156: 399-402.
- [27] 于荣,徐明岗,王伯仁.土壤活性有机质测定方法的比较[J].中国土壤与肥料,2005(2):49-52.
YU Rong, XU Ming-gang, WANG Bo-ren. Comparison of determination methods of soil active organic compounds[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2005(2): 49-52.
- [28] 张俊华,李国栋,南忠仁,等.黑河绿洲区耕作影响下的土壤粒径分布及其与有机碳的关系[J].地理研究,2012,31(4):608-618.
ZHANG Jun-hua, LI Guo-dong, NAN Zhong-ren, et al. Research on soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbon under the effects of tillage in the Heihe oasis[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(4): 608-618.
- [29] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等.土壤特性空间变异性初步研究[J].水利学报,1985(9):12-23.
LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XU Zhi-rong, et al. Preliminary study on spatial variability of soil properties[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985(9): 12-23.
- [30] 瞿园园,郝敏,孔范龙,等.胶州湾滨海湿地土壤有机碳时空分布及储量[J].应用生态学报,2016,27(7):2075-2083.
ZI Yuan-yuan, XI Min, KONG Fan-long, et al. Spatial and temporal distribution and reserves of soil organic carbon in coastal wetland of Jiaozhou Bay[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2075-2083.
- [31] 雷泽湘,徐德兰,顾继光,等.太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):698-704.
LEI Ze-xiang, XU De-lan, GU Ji-guang, et al. Distribution characteristics of large aquatic plants in Taihu Lake and its effect on lake nutrient[J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2008, 27(2): 698-704.