

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

有机质对海相软土物理力学特性的影响效应分析

苟富刚, 龚绪龙, 陆徐荣, 李明亮

Effect of organic matter content on physical-mechanical properties of sea soft soil

GOU Fugang, GONG Xulong, LU Xurong, and LI Mingliang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109033

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机质含量及组分对泥炭土物理力学性质影响

Influence of organic matter content and ingredient on the physical and mechanical properties of peat soils 裴利华,杨醒宇,桂跃,王兆昌,张毅 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 77-85

冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing-thawing

杨平, 刁鹏程, 张婷, 杨国清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 96-104

含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture 邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111

生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究

Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme 董辉, 程子华, 刘禹岐, 朱宪明 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 84-94

某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel 刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108–115

各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil 赵洲, 宋晶, 刘锐鸿, 杨守颖, 李志杰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 70-77



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109033

苟富刚, 龚绪龙, 陆徐荣, 等. 有机质对海相软土物理力学特性的影响效应分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 195-203. GOU Fugang, GONG Xulong, LU Xurong, *et al.* Effect of organic matter content on physical-mechanical properties of sea soft soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 195-203.

有机质对海相软土物理力学特性的影响效应分析

苟富刚,龚绪龙,陆徐荣,李明亮

(江苏省地质调查研究院/自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室,江苏南京 210049)

摘要:有机质是海相软土的重要组成部分,其对土体物理力学性质的影响有待深入研究。以连云港地区全新世海相软土为例,进行百组土体有机质物理力学试验。结果表明,研究区软土有机质含量平均值为0.98%,在0.90%~1.00%这个区间分布最为广泛。有机质含量在空间上分布不均,平行海岸线较垂直海岸线土体有机质含量变化小,自上向下变化规律复杂,但随着深度的增加有机质含量有增加的趋势;有机质含量与土体天然含水率、塑限、液限在0.01水平上显著正相关,与 土体天然密度、干密度和比重在0.01水平上显著负相关,与土体粉粒含量在0.05水平上显著正相关,与土体黏粒含量相关性差;有机质含量与固结压力 <400 kPa阶段的孔隙比在0.01水平上显著正相关,与固结压力>400 kPa时的孔隙比相关性变差,这与有机质形成的复合体被破坏有关;海相软土黏土矿物、含盐量及含水率高,有机质与黏土矿物在碱性环境多通过阳离子键桥的方式来结合,形成有机复合体,可能参与千年及万年尺度的碳循环;研究土层最大埋深达30m,符合有机质深埋的演化规律,而研究土体沉积时间距今最高才约8000a,推测研究土体有机质还未达到平衡状态,还在进一步的循环演化过程当中。上述相关研究成果对海相软土分布区工程建设具有一定的参考价值。

关键词: 有机质;腐殖质;沉积年代;物理力学;碳循环

中图分类号: P642.13⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2022)05-0195-09

Effect of organic matter content on physical-mechanical properties of sea soft soil

GOU Fugang, GONG Xulong, LU Xurong, LI Mingliang

(Geological Survey of Jiangsu Province/Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Natural Resources, Nanjing, Jiangsu 210049, China)

Abstract: Soil organic matter (SOM) is an important part of marine soft soil, and its role in the physicomechanical properties of the soil needs to be studied urgently. The Holocene marine soft soil in the Lianyungang area is taken as an example, and a hundred groups of SOM tests and physico-mechanical tests are carried out. The results show that the average SOM content is 0.98% in the study area. The SOM content is most widely distributed in the interval of 0.90%–1.00%. The SOM content is unevenly distributed in space. The SOM content of the parallel coastline has a smaller change than that of the vertical coastline. The top-down change rule is complicated, but the overall trend of the SOM content increases with the increasing depth. SOM content is significantly positively correlated with natural moisture content, plastic limit and liquid limit at the level of 0.01. The SOM

收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2021-11-03 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 连云港市人民政府、江苏省自然资源厅连云港城市地质调查项目(20170821); 江苏省自然资源厅江苏海岸带地质资源环境监测项目(JTCC-2102AW3503)

第一作者: 苟富刚(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程地质和环境地质研究工作. E-mail: gfggfg@foxmail.com

content has a significant negative correlation with the natural density, dry density and specific gravity in the soil at the level of 0.01. The SOM content and the powder content in the soil are significantly positively correlated at the 0.05 level. The SOM content are poorly correlated with clay content. The SOM content is significantly positively correlated with the void ratio at the stage when the consolidation pressure is less than or equal to 400 kPa at the level of 0.01. The correlation between the void ratio and the SOM content becomes worse when the consolidation pressure is greater than 400 kPa, which is related to the destruction of the complex formed by the SOM content. Marine soft clay minerals have high salinity and water content. SOM and clay minerals are mostly combined through cationic bond bridges in alkaline environments to form organic complexes, which may participate in the millennium and 10 000-year scale carbon cycle. The maximum buried depth of the studied soil is 30 m, which is in line with the evolution law of deep burial of SOM. The maximum deposition time of the studied soil is only about 8 000 years. It is speculated that the SOM has not reached the equilibrium state in the study area, and it is still in the process of further cyclic evolution. The relevant research results of this study are of certain reference value for the engineering construction in the marine soft soil distribution areas.

Keywords: organic matter; humus; sedimentary age; physical mechanics; carbon cycle

全球以土壤有机质形式存在的有机碳约有 1.46× 10¹⁶ kg, 有机碳总量是大气碳库和生物碳库的 3.3~ 4.5 倍^[1]。土壤有机质是释放与截获 CO₂ 的重要来源 和重要载体,在全球碳循环中具有重要作用^[2]。尽管 在地球系统中有机碳库储量可观,但能以有机质的形 式进入土体沉积物的比例很小,最终能在古土壤中保 存下来的比例就更小了,大约仅占0.1%。保存在土体 中的有机质在时间和空间分布上极不均匀。有机质 中的腐殖质可以在土体中保存 50~3000 a 而不分 解^[4]。有机质可溶性组分胡敏酸和富里酸演化达到平 衡所需要的时间一般大于 200 ka, 不可溶组分胡敏素 需要时间一般大于 700 ka^[5]。腐殖质在深埋状态、升 温和增压作用下使有机质转化为有机复合体。有机 复合体具有抵抗微生物降解的能力,能长期保存在沉 积物中16。有机质成分复杂,具有孔隙大、比表面积大 和吸附性强的特点,因此有机质软土具有"三高三低" 特性,即高天然含水率、高天然孔隙比、高压缩性和 低强度、低渗透性、低固结系数,这类软土往往给工 程建设带来很大的影响。研究区陇海线铁路中云台 段通车后 8 a 内工后沉降最大值达 2.5 m^[7]。连云港某 基坑工程桩顶最大位移达到 820 mm,软土从基坑支护 管桩中间大量涌入基坑,造成基坑临近道路路面开裂 15 cm, 下沉最大量达到 30 cm^[8]。

目前,众多学者研究了有机质对土体物理力学特性的影响。主要得到以下结论:有机质含量与液限、 塑限和塑性指数、含水率及孔隙比正相关^[9-11];有机 质与原生矿物石英、长石等相互独立赋存,与黏土矿 物密切共存^[9];有机质会参与沉积土体结构的形成,与 土体中的黏粒、粉粒相互作用形成形式各异的土体结 构^[11];有机质含量与土粒比重呈负相关,最大降幅可 达21%^[12];有机质土的含水率通常很高,含水率与有机 质含量正相关^[13],如秘鲁大陆架边缘沉积土有机碳含 量达到10%~18%时,含水率可以达到200%~400%^[14]。

关于有机质对土体压缩性状的影响主要集中在 高有机质土(一般多为泥炭土,有机质含量在40%以 上,本文所述有机质含量均为质量分数),对低有机质 土(有机质含量在20%以内)压缩性状的相关研究尚 不多见,特别是天然沉积软土。天然沉积软土和泥炭 的压缩试验数据说明富含有机质的泥炭具有更高的 天然含水率,泥炭的压缩指数远高于一般的软黏土^[15]。 人工有机质土压缩指数会随着有机质含量的增加而 增大^[16]。当有机质含量为1.74%时,力学软化效应尤 为显著,且此时软土的渗透能力达到最大^[10]。有机质 的分解程度直接影响土体的压缩性,分解程度越高, 有机质对土体的压缩性影响越小^[17]。

目前对我国东部滨海区域海相软土的有机质特 征缺乏系统研究,据不完全统计主要有文献 [18-20] 的相关研究。海相软土的沉积环境较为特殊,土体中 的有机质组分演化规律也是本文的研究内容之一。 研究区布置两条采样剖面,采集有机质样品和土工测 试样品,进行有机质的空间分布变异特征、有机质对 土体物理力学特性的影响效应及有机质的物质组成 循环演化研究。研究成果对海相软土分布区工程建 设具有一定的参考价值。

1 样品采集及试验方法

1.1 样品采集

研究区位于我国东部滨海区域,地处苏鲁造山带 地层区,是一个长期隆起剥蚀区,有可能从震旦纪至 三叠纪均为古陆,中生代以来以岩浆侵入和块断作用 为其特色,大部分地区被第四系地层所深覆盖。研究 对象为全新世形成的海相软土,层厚约15m。在海相 软土分布区布置两条样品采集剖面,一条近东西向, 一条平行于海岸线(图1),采样深度0~23m,每间隔 1~3m采集1个样品,共采集153组样品,大部分为 原状样品,个别样品为扰动样。在测试有机质的同 时,测试物理指标(易溶盐含量、塑限、液限、含水率、 密度、比重、天然含水率、粒度特征等)和力学指标 (固结试验和剪切试验)。





1.2 试验方法与过程

1.2.1 有机质含量测定

有机质测定方法很多,如质量法、容量法、双氧水 氧化法、比色法等,目前采用较多的是重铬酸钾容量 法和灼失量法。《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019) 里有机质试验采用重铬酸钾容量法,当有机质含量大 于15%时,不能采用该方法,因为重铬酸钾氧化能力 有限,有机质含量太高将导致指示剂无法指示终点, 文献 [21] 建议有机质含量在小于10%时采用重铬酸 钾容量法。《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001) 中有机质试验采用灼失量法,测试温度为550℃。灼 失量法是比较粗略估计有机质含量的试验方法。根 据数据统计结果,区域、沉积时代及测试方法不同,测 出的有机质含量均有差异。研究区海相软土有机质 含量介于0.268%~1.520%^[15-16],而文献[17]给出研究 区海相软土有机质含量介于6.1%~6.9%。对比发现, 即使同一土层,不同测试单位测得的有机质数据差异 也很大,这与测试方法的选择有关,灼失量法测量结 果一般偏大。

研究区的海相软土含有大量碱金属,土体易溶盐 氯离子含量最高达1755 mg/kg,平均值为1299 mg/kg, 以 NaCl 为主^[22]。在400 °C 左右的高温下,易溶盐物 质大都分解成 HCl 和 CO₂,所以灼失量法不适用于本 文研究土体,重铬酸钾容量法较为适合。用一定浓度 的重铬酸钾及硫酸溶液氧化土体中的有机碳,化学方 程式见式(1),依据消耗的重铬酸钾量计算土体中有 机碳的含量,土体中有机质成分复杂,含碳量不同,根 据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)有机碳 含量与有机质含量存在转化系数1.724,将测得有机碳 含量乘以1.724 换算为有机质含量。

> $2K_{2}Cr_{2}O_{7} + 81H_{2}SO_{4} + 3C =$ $2K_{2}SO_{4} + 2Cr_{2}(SO_{4})_{3} + 3CO_{2} + 8H_{2}O$ (1)

1.2.2 力学指标

设计一维固结试验 74 组:一般固结试验最大固结 压力为 400 kPa,本次研究最大固结压力 3 200 kPa,共 10 级固结压力。对于软土地基来说,不排水剪切指标 是工程设计的重要参数,设计三轴 UU(不固结不排 水)试验 31 组;设计快剪(不固结不排水)试验 23 组。 采集 141 件原状样品,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)进行含水率、天然密度、压缩模 量、压缩系数、压缩指数、回弹模量等物理力学指标 测试。

1.2.3 测年分析

采集 30 件样品进行 AMS¹⁴C 测年分析, 测年对象 为无污染的贝壳、植物碎屑与螺壳。

1.2.4 数据分析方法

可以用线性回归模型描述和解决工程问题。有 机质含量与多个物理指标进行多元拟合,拟合精度不 会明显提高^[23]。选择有机质含量与物理力学指标之间 进行两两比较,相关系数绝对值越大,相关性越高,说 明两指标之间存在线性关系,进而建立有机质含量与 物理力学指标之间的拟合关系式。

2 测试结果

2.1 有机质含量测试结果

全新世海相软土有机质含量平均值为 0.98%, 区 间为 0.36% ~ 1.56%, 在 0.9% ~ 1.0% 区间分布最为广 泛。偏度为-0.34, 属于左偏态。峰度为 0.84, 小于 3, 正态分布曲线平坦(图 2)。

本次统计有机质样本总数为153个,大于100,采 用偏度和峰度进行总体正态性检验,偏度检验符合正 态分布(偏度检验值为1.77,小于1.94);但峰度检验值 落在拒绝域(峰度检验值为5.62,大于1.94),所以拒绝 原假设,不符合正态分布^[24]。研究区有机质含量普遍 偏低,未见未分解的植物纤维。

根据软土物理力学统计指标(表 1)可以看出,研究 软土具有高含水率、高液限、高压缩性及低强度的特点。



图 2 有机质含量分布频次统计



表1 软土的物理力学特性

Develop machanical properties of soft ala

	Table 1 Thysico-mechanical properties of soft clay												
项目	有机质 含量/%	粉粒 含量/%	黏粒 含量/%	天然密度 /(g·cm ⁻³)	天然含 水率/%	天然 孔隙比	液限/%	塑性 指数/%	液性 指数/%	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩 模量/MPa	c _{UU} /MPa	$arphi_{\mathrm{UU}}$ /(°)
最大值	1.56	68.7	51.1	1.93	74.9	1.98	56.10	26.60	5.18	2.51	4.10	17.00	2.90
最小值	0.36	45.2	31.1	1.56	30.9	1.00	22.80	10.00	1.00	0.50	1.10	2.00	0.30
平均值	0.98	58.8	39.5	1.70	54.0	1.42	43.54	19.33	1.58	1.28	2.00	7.23	0.87
个数	153	48	48	141	141	141	141	141	141	97	97	31	31
变异系数	0.22	0.09	0.12	0.04	0.16	0.15	0.13	0.18	0.33	0.30	0.26	0.50	0.63
偏度	-0.34	-0.76	0.78	0.73	-0.18	-0.12	-0.25	-0.58	2.98	0.40	1.52	0.88	2.11
峰度	0.84	0.46	0.57	0.24	0.54	0.21	0.67	1.14	16.68	0.34	3.59	0.57	5.56

注: cuu为三轴UU试验得出的黏聚强度; quu为三轴UU试验得出的内摩擦角。

2.2 有机质含量空间分布

以布设的两条典型剖面为例进行说明。剖面1为 近东西向,布设 ZK1-ZK5 号孔,有机质含量变化见 图 3。ZK1 号孔软土厚度仅 4.50 m, 有机质含量为 0.89%~0.93%,平均值为0.91%,变化幅度小。ZK2号 孔软土厚度 10.61 m, 有机质含量为 0.74%~1.14%, 变 化幅度大, 埋深在 3.25~9.25 m 有机质含量高, 在 3.25 m 处达到最大值 1.14%; 9.25 m 以下有机质含量 锐减,有机质含量为0.74%~0.75%。ZK3号孔软土厚 度 13.91 m, 有机质含量为 0.92%~ 1.05%, 变化幅度 小,有机质含量自上向下有递增的趋势,仅在 4.05 m 处减小,达到最小值 0.92%; ZK4 号孔软土厚度 14.6 m, 有机质含量为 0.68%~1.11%, 变化幅度大, 有机质含 量自上向下有递增的趋势,在11.20,15.25m处达到最 大值 1.11%, 在埋深 13.20 m 处有机质含量略微减小。 ZK5 号孔软土厚度 13.25 m, 有机质含量为 0.74% ~ 1.09%, 有机质含量自上向下变化规律复杂,可分为3段。

剖面2平行于海岸线,布设ZK6-ZK9号孔,有机



质含量变化见图 4。ZK6 号孔软土厚度 10.33 m, 有机 质含量为 0.81% ~ 1.09%, 有机质含量自上向下变化规 律复杂, 可分为 5 段。ZK7 号孔软土厚度 13.20 m, 有 机质含量为 0.84% ~ 1.19%, 有机质含量自上向下先增 加, 再保持稳定, 后增加。ZK8号孔软土厚度 20.45 m, 有机质含量为 0.88% ~ 1.15%, 变化幅度大, 变化规律 可分为两段, 有机质含量在 5.25 ~ 11.25 m 有机质含量 自上向下有递增的趋势,仅在 9.25 m 处有机质含量递减,11.25~23.20 m 有机质含量基本自上向下保持稳定,变化微弱。ZK9 号孔软土厚度 13.25 m,有机质含量为 0.88%~1.06%,有机质含量自上向下变化规律复杂,可分为 4 段。



整体上来看,有机质含量在空间上分布不均,平 行海岸线较垂直海岸线有机质含量变化小,自上向下 变化规律复杂,但随着深度的增加有机质含量整体趋 势是增加的。

3 分析与讨论

3.1 有机质含量与物理力学参数相关性分析 有机质与黏土矿物形成的复合体对土体的物理

力学性质有着重要影响,比如土的天然含水率、湿密 度、塑限、液限等物理指标及压缩性、强度等力学指 标。有机质中真正能严重影响土的工程性质的是腐 殖酸、微生物及其代谢产物。有机质含量与物理力学 参数相关性见表 2, 有机质和土中的粉粒(粒径 0.005~ 0.075 mm)含量在 0.05 水平上显著正相关,相关系数 为 0.342。有机质含量与黏粒含量相关性差。有机质 含量与砂粒含量在 0.05 水平上显著负相关, 相关系数 为-0.320。此外,有机质含量与快剪黏聚力在 0.05 水 平上显著负相关,相关系数为-0.957,这和砂粒含量与 有机质含量相关性表现出的相关规律一致。软土衍 射结果显示原生矿物主要为石英和长石,分别约占矿 物的 47.5% 和 10.6%。土体中与粉粒、黏粒结合的碳 以胡敏素为主,且粉砂粒和黏粒以固定稳定性碳为 主[25]。本文研究成果与前人研究成果基本一致,但粉 粒与有机质的相关性高于黏粒与有机质的相关性,这 可能与不同研究学者所采取的粒级划分标准不同以 及研究软土沉积时间较长有关。有机质含量与土的 塑限、液限在 0.01 水平上显著正相关, 相关系数分别 为 0.425、0.349。有机质含量与塑性指数和液性指数 在 0.05 水平上显著正相关,相关系数分别为 0.252、0.255。 这与前人研究成果基本一致,即随着有机质含量的增 加,土体液限、塑限提高^[26]。有机质含量与土的天然 密度、干密度和比重在 0.01 水平上显著负相关, 相关

表 2 有机质含量与土体物理指标相关性统计表 Table 2 Correlation statistics of SOM content and soil physical indicators

指标	深度	粉粒含量	黏粒含量	砂粒含量	天然含水率	比重	湿密度	干密度	孔隙比	液限	液限	塑性指数	液性指数
相关性	0.476**	0.342*	-0.013	-0.325*	0.604**	-0.526**	-0.630**	-0.626**	0.596**	0.349**	0.425**	0.252*	0.255*
样本数	89	48	48	48	74	74	74	74	74	74	74	74	74
24	*キニナの		1)1日本和	・ そ * キニナ	· · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·) F 日 幸 相う	4 丛店主	二年七十二	ニナナ州				

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。负值表示负相关,反之亦然。

系数分别为-0.630, -0.626, -0.526。有机质含量与土的天然含水率在 0.01 水平上显著正相关, 相关系数为 0.604(图 5)。有机质含量影响土体物理性质表现在改善了软土的结构, 使孔隙度和土体中的胶体含量增加, 因此土体天然含水率也增加。

有机质含量与孔隙比相关性分析见表 3、图 6。 有机质含量与天然孔隙比在 0.01 水平上显著正相关, 相关系数为 0.596;有机质含量与固结压力 25,50,75, 100,200,400 kPa下的孔隙比在 0.01 水平上显著正相关, 与固结压力 50 kPa下的孔隙比相关性最高,相关性为 0.609;有机质与固结压力 800 kPa下的孔隙比在 0.05 水平上显著正相关;与固结压力 1 600,3 200,12.5 kPa





Table 3	Correlation between SOM content and soil void ratio under various pressures	
	衣 3 有机质含重与工体不问固结压力下扎限比的相关性	

指标	<i>e</i> _{12.5}	e ₂₅	e_{50}	<i>e</i> ₇₅	e_{100}	e_{200}	e_{400}	e_{800}	e_{1600}	e_{3200}	压缩系数	压缩模量
相关性	0.257	0.606**	0.609**	0.592**	0.595**	0.563**	0.483**	0.311*	-0.062	-0.239	0.598**	-0.604**
样本数	13	41	74	41	74	74	74	60	41	17	41	74
注:e_z为固结压力12.5 kPa下的孔隙比,其它依次类推:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。负值表示负相关,反												

注: e₁₂₅为固结压力12.5 kPa下的孔原比, 具匕侬伏突推; **表示在0.01水平(双侧)上並者相大; *表示在0.05水平(双侧)上並者相大。页值表示页相大, 之亦然





下的孔隙比相关性差。有机质含量与压缩指数在 0.05水平上显著正相关(样本总数为32个),相关系 数为0.440;有机质含量与回弹指数相关性不明显 (图7)。





海相软土黏土矿物含量高、含盐量高及含水率高,有机质与黏土矿物在碱性环境下多通过阳离子键桥的方式来结合,形成有机复合体,复合体有助于提高土体的力学性能。当固结压力小于等于400 kPa,有机质与各级压力下的孔隙比具有一定的相关性;当固

结压力大于 400 kPa, 有机质与各级压力下的孔隙比相 关性差, 说明软土中有机质含量变化对土体压缩性有 一定的影响, 固结压力的界限为 400 kPa。

3.2 有机质物质组成循环演化

有机质是很复杂的物质,很难给出确切定义。有 机质泛指存在于土体中的各类含碳有机化合物,包 括动植物残体、微生物、水溶性有机质(富里酸和胡 敏酸)、非水溶性有机质(胡敏素)和稳定的有机物质 等^[4]。由于研究软土沉积时为浅海环境,所以主要为 嫌氧条件分解动植物残体、有机质产生有机酸、乙醇 等中间产物;在极厌氧条件下产生甲烷、氢气等,但由 于研究软土沉积环境中富含SO⁴₄,该矿化作用发生的 概率很小。动植物残体经过一系列生物分解、化学分 解或者复合生物化学分解作用,形成腐殖酸^[27](图 8)。 腐殖酸又是腐殖质的主要成分,约占腐殖质含量的 60%,对软土物理化学性能起决定性影响^[28]。腐殖质 包含富里酸、胡敏酸和胡敏素,其中胡敏素是腐殖酸 中的胡敏酸与黏土矿物质结合的惰性部分。



HA 为胡敏酸; HM 为胡敏素。

黏土矿物对有机质的固定作用不仅与矿物类型 有关,还与其保护机制及土体所处沉积环境有关^[29]。 研究区软土的黏土矿物含量高,伊蒙混合体约占 56%, 伊利石约占 30%^[30]。研究区海相软土浸出液 pH 值为 7.45~9.68,平均值8.25,主要分布在8.0~8.5区间。 研究土体含水率平均值为 56.68%, 含水率最高达到 72.4%, 软土浸出液离子浓度最高为 32 348 mg/L, 阳离 子浓度最高为20415 mg/L。在高盐水环境条件下,双 电层厚度由于静电收缩作用变薄,便于溶解性有机质 组分接近黏土矿物表面进行结合反应[31],腐殖质更容 易吸附在黏土颗粒上以及包封在黏粒集中体中,所以 有机物的黏结作用促进了悬浮物的絮凝,促使悬浮物 从海水中沉淀下来。在 pH>6 时, 黏土矿物蒙脱石的 吸附机制主要是阳离子键桥作用,高岭石的吸附机制 主要是疏水性作用^[32]。研究土体孔隙液离子浓度高, 且为碱性土体,导致富里酸在矿物上的吸附量随离子 浓度的升高而逐渐增大,溶解性有机质分子中的 -COOH、-COH等活性官能团解离,溶解性有机质组 分亲水性增强,阳离子键桥作用成为黏土矿物重要的 吸附机制^[33],从而形成有机复合体(图 8)。

研究土体有机质和易溶盐中的 Ca2+在 0.05 水平上 显著负相关,说明 Ca²⁺参与了这一作用,促使阳离子键 桥和水桥作用增强。阳离子键桥的作用方式属化学 吸附,可能参与千年及万年尺度的碳循环^[34]。有机复 合体可以抵抗微生物降解,因此能长期保存在沉积物 中¹⁶。腐殖质可以在土体中保存 250~3000 a 而不分 解^[4]。古土壤有机碳达到稳定所需要的时间为 330~ 410 ka^[33]。以上众多的研究成果表明,前人低估了有 机质的稳定性。在深埋状态、升温和增压作用使有机 质一部分转化为不溶于酸碱的大分子干酪根,总体演 化方向是朝着低自由能的稳定态方向。研究土层最 大埋深达 30 m,符合有机质深埋的特点。根据 AMS¹⁴C 测年数据结果显示,研究区软土沉积年代最晚为(7744± 87) cal.a B.P., 即研究有机质经过了约8 ka 演化。古土 壤中胡敏素、胡敏酸、富里酸含量随着沉积时间的增 加,有机质组分呈递减趋势,经过万年的演化,古土壤 中腐殖质各组分含量大小的大致顺序是胡敏素>胡敏 酸>富里酸,有机质可溶性组分胡敏酸和富里酸演化 达到平衡所需要的时间为20多万年,不可溶组分胡 敏素需要时间一般大于 700 ka^[5]。而研究土体沉积时 间距今最高才约8ka,且软土沉积环境为浅海环境,由 于为缺氧环境,微生物分解作用不仅慢而且不彻底, 矿化作用受阻;另一方面,研究土体黏土矿物含量高, 腐殖化系数高,不利于腐殖化作用,加长了循环过程; 且有机质含量与其埋深呈正相关,因此推测研究土体 有机质还未达到平衡状态,还在进一步循环演化过程 当中。

4 结论

(1)研究区全新世软土有机质含量平均值为 0.98%, 区间为 0.36% ~ 1.56%, 在空间上分布不均, 平行海岸 线较垂直海岸线有机质含量变化小, 自上向下变化复 杂, 但随着深度的增加有机质含量整体具有增加的趋 势。有机质含量和土体埋深在 0.01 水平上显著正相 关, 相关系数为 0.488。

(2)有机质含量与天然含水率的相关性最高;与 土的天然孔隙比、塑限、液限、天然密度、干密度、比 重在 0.01 水平上显著相关;与土的粉粒含量、砂粒含 量、塑性指数、液性指数在 0.05 水平上显著相关。固 结压力 50 kPa下的孔隙比与有机质含量相关性最高, 相关系数为 0.609。固结压力大于 400 kPa下的孔隙比 与有机质含量相关性差,这与有机质形成的复合体被 破坏有关。

(3)研究区海相软土浸出液呈碱性,含盐量高,含水率高,土体黏土矿物以伊利石和伊蒙混合体为主; 有机质与黏土矿物多通过阳离子键桥的方式结合,形成有机复合体,可能参与千年及万年尺度的碳循环; 土层最大埋深达 30 m,符合有机质深埋的演化规律, 推测研究土体有机质还在进一步循环演化过程当中。

参考文献(References):

- SCHARLEMANN J P, TANNER E V, HIEDERER R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. Carbon Management, 2014, 5(1): 81 91.
- [2] DONALD L W. Use of humic substances in remediation of contaminated environments [M]//KLAVINS M, SERZANE J. Bioremediation of Contaminated Soils. Boca Raton: CRC Press, 2000; 231 – 249.
- [3] WU F C, XING B S. Natural organic matter and its mechanism in the environment -vol 1[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010; 83 – 109.
- [4] STEVENSON F J. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1994.
- [5] 孙旭辉,李福春,师焕芝,等. 土壤腐殖物质特征及其 对有机碳长时间尺度稳定性的指示:以陕西洛川黄 土剖面为例[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 117-124.
 [SUN Xuhui, LI Fuchun, SHI Huanzhi, et al. Characteristics of humic substances in soil and its implication to long-term stability of organic carbon: A case of Luochuan loess profile[J]. Earth Science Frontiers,

2011, 18(6): 117 - 124. (in Chinese with English abstract)]

- [6] MIKUTTA R, SCHAUMANN G E, GILDEMEISTER D, et al. Biogeochemistry of mineral-organic associations across a long-term mineralogical soil gradient (0.3-4100 kyr), Hawaiian Islands[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(7): 2034 – 2060.
- [7] 王晓军. 连云港基桩工程倾斜事故及对策分析[J]. 江 苏建筑, 2016(1): 98-100. [WANG Xiaojun. Analysis of Lianyungang pile engineering tilt accident and countermeasure[J]. Jiangsu Construction, 2016(1): 98-100. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 章定文,刘松玉.试论连云港海相软土路堤沉降规 律[J].岩土力学,2006,27(2):304-308. [ZHANG Dingwen, LIU Songyu. Settlement features of embankment of Lianyungang marine clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2):304-308. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李学,刘治清,宋晶,等.有机质在吹填淤泥固结中的 微宏观特征[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 28 - 35. [LI Xue, LIU Zhiqing, SONG Jing, et al. Micro-macro characteristics of organic matters in dredger fill consolidation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 28 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 牟春梅,李佰锋. 有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 42 46.
 [MU Chunmei, LI Baifeng. Influence of organic matter on mechanical character of soft soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 42 46. (in Chinese with English abstract)]
- PAUL M A, BARRAS B F. Role of organic material in the plasticity of Bothkennar clay[J]. Géotechnique, 1999, 49(4): 529 - 535.
- [12] SANTAGATA M, BOBET A, JOHNSTON C T, et al. One-dimensional compression behavior of a soil with high organic matter content[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(1): 1 – 13.
- [13] SHACKELFORD C D, MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 125(1/2/3): 275 – 276.
- [14] KELLER G H. Organic matter and the geotechnical properties of submarine sediments[J]. Geo-Marine Letters, 1982, 2(3/4): 191 – 198.
- [15] MESRI G, STARK T D, AJLOUNI M A, et al. Secondary compression of peat with or without surcharging[J].

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(5): 411 – 421.

- [16] ISLAM M R, ALAMGIR M, BASHAR M A. Compressibility properties of reconstituted organic soils at Khulna region of Bangladesh[C]// RABBEE T. Soft soil engineering: Proceedings of the Fourth International Conference on soft soil engineering. Vancouver: CRC Press, 2006; 367.
- [17] 刘飞,陈俊松,柏双友,等.高有机质软土固结特性与机制分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3453 3458.
 [LIU Fei, CHEN Junsong, BAI Shuangyou, et al. Analysis of formation mechanism and consolidation characteristics of high organic soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3453 3458. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 蔡国军,刘松玉,邵光辉,等.基于电阻率静力触探的海相黏土成因特性分析[J]. 岩土工程学报,2008,30(4):529-535. [CAI Guojun, LIU Songyu, SHAO Guanghui, et al. Analysis of formation characteristics of marine clay based on resistivity cone penetration test (RCPT)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4):529-535. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 严海兵,陈敏东,李秉柏.江苏滨海盐土有机质含量的空间变异研究[J].江苏农业科学,2008,36(3): 224-228. [YAN Haibing, CHEN Mindong, LI Bingbai. Spatial variation of organic matter content in Jiangsu coastal salt soils[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2008, 36(3): 224-228. (in Chinese)]
- [20] 杨晓明.水泥处置高含盐量软土的微观试验和机理研究[D].上海:同济大学,2006.[YANG Xiaoming. Microstructure and mechanism research on cement stabilized salt-rich clay[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 彭丹. 土工试验中有机质含量测定方法对比分析
 [J]. 广东化工, 2018, 45(20): 44 45. [PENG Dan. Comparative analysis of methods for determination of organic matter content in geotechnical tests[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(20): 44 - 45. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 苟富刚, 龚绪龙, 杨磊, 等. 江苏沿海地区土体含盐 特征及指示作用[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1380 - 1387. [GOU Fugang, GONG Xulong, YANG Lei, et al. Indicative functions and characteristics of soil salinity in coastal Jiangsu area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(6): 1380 -

1387. (in Chinese with English abstract)]

- [23] YOON G L, KIM B T, JEON S S. Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1213 – 1221.
- [24] KVAM P H, VIDAKOVIC B. Nonparametric statistics with applications to science and engineering[M]. Hoboken; John Wiley &Sons, 2007.
- [25] COVALEDA S, PAJARES S, GALLARDO J F, et al. Short-term changes in C and N distribution in soil particle size fractions induced by agricultural practices in a cultivated volcanic soil from Mexico[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(12): 1943 – 1948.
- [26] BUSCH W H, KELLER G H. The physical properties of Peru-Chile continental margin sediments the influence of coastal upwelling on sediment properties[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51: 709 – 715.
- [27] 李生林,秦素娟,韩爱民.软土中的蛋白质总量及其 工程意义[J].岩土工程学报,1994,16(6):56-63.
 [LI Shenglin, QIN Sujuan, HAN Aimin. Total protein content in soft soil and its application to engineering geology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(6):56 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [28] KCONONOVA M. Soil organic matter: Its nature, its role in soil formation and in soil fertility[M]. Britain: Pergamon press, 2013.
- [29] KAISER M, ELLERBROCK R H. Functional

characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment[J]. Geoderma, 2005, 127(3/4): 196 – 206.

- [30] 苟富刚, 龚绪龙, 王光亚. 连云港海相软土不排水强度特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(4): 1165 1173. [GOU Fugang, GONG Xulong, WANG Guangya. Shear strength and failure characteristics of marine soft soil in Lianyungang[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2018, 48(4): 1165 1173. (in Chinese with English abstract)]
- [31] WENG L, RIEMSDIJK W H V, HIEMSTRA T. Adsorption of humic acids onto goethite: Effects of molar mass, pH and ionic strength[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 314(1): 107 – 118.
- [32] 滕飞,李福春,吴志强,等. 高岭石和蒙脱石吸附胡敏 酸的对比研究[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 892 898.
 [TENG Fei, LI Fuchun, WU Zhiqiang, et al. A comparative study of the humic acid adsorption capability between kaolinite and montmorillonite[J]. Geology in China, 2009, 36(4): 892 898. (in Chinese with English abstract)]
- [33] LIU A, GONZALEZ R D. Adsorption/ desorption in a system consisting of humic acid, heavy metals, and clay minerals[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 218(1): 225 - 232.
- [34] YARIV S, CROSS H. Organo-clay complexes and interactions [M]. New York: Dekker, 2001: 39 –111.

编辑:宗 爽