

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0331-07

湛江组灰色黏土空间展布规律研究

沈建华, 汪 稔, 朱长歧

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 分布于湛江地区的湛江组灰色黏土因其特有的强结构性在实际工程中产生一系列岩土工程问题, 20 世纪 80 年代已为国内众学者所关注。由于湛江组地层在雷州半岛区域内, 具有不同沉积环境而表现出不同空间展布规律, 实际工程中难以掌握其分布特性。根据现场地质调查资料, 结合雷州半岛的地形地貌、地质构造以及湛江组地层的沉积环境, 在雷州半岛布置 27 个钻孔进行地质钻探取样。不同区域典型地层剖面图说明, 灰色黏土在不同的沉积环境有着不同沉积韵律、埋藏深度、地层厚度等, 分布具有区域性, 根据层顶埋深及地层厚度分析灰色黏土的结构性对实际工程的影响。同时, 根据钻孔地层数据, 利用基础 GIS 软件平台 MAPGIS 构建湛江组结构性黏土空间展布规律三维地质模型, 全面展示出灰色黏土在雷州半岛的整个展布规律, 实现灰色黏土空间展布的可视化, 最后简单地介绍该模型的基本应用。

关键词: 湛江组灰色黏土; 空间展布规律; 三维地质模型、

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Research on spatial distribution law of gray clays of Zhanjiang Formation

SHEN Jian-Hua, WANG Ren, ZHU Chang-qi

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Gray clay of Zhanjiang Formation which widely distributes in Zhanjiang area have caused a series of geotechnical engineering problems in actual projects due to their strong structural characteristics which aroused great interest among Chinese scholars in 80 s of 20 century. It is difficult to understand the distribution of the Zhanjiang Formation, because different sedimentary environment shows different spatial distribution of the Zhanjiang formation in Leizhou peninsula. According to the data from site geology survey, 27 geological drillings had been done for the gray clay samples in different regions considering lots of factors such as topography, geological structure at Leizhou Peninsula as well as the sedimentary environment of Zhanjiang Formation. The typical profiles of different areas showed that gray clay had different sedimentary cycles, buried depth and thickness in different sedimentary environment. Its distribution is regional. The influences of gray clay on real projects were studied based on its buried depth and thickness. Additionally, a 3D geological model of spatial distribution of gray clay was established by using MAPGIS based on drilling survey data. This geological model can be used to study the spatial distribution of Zhanjiang Formation gray clays, and realized the visualization of gray clay spatial distribution. Finally, some basic applications of the proposed model are introduced.

Key words: Zhanjiang Formation gray clay; spatial distribution law; 3D geological modeling

1 前 言

湛江地区灰色黏土以其特有的强结构性, 20 世纪 80 年代就为国内学者所关注, 已进行了相关研究^[1-5]。湛江灰色黏土孔隙比大、含水率高、天然重度小, 为高~中压缩性土, 土体灵敏度较高(部分地区高达 10), 具有较大结构性。多年来, 湛江地区灰色黏

土层因其特殊的工程特性, 给实际工程带来的一系列岩土工程问题。据调查, 60~70 年代建于结构性黏土上的部分房屋因受其影响, 墙体均出现了不同程度的开裂; 灰色黏土为路基的上路面经过晴雨天影响后发生变形, 多处黏土路堑边坡大雨后发生了滑坡; 基坑开挖过程中容易出现垮塌事件, 挖掘钻机施工中出现突然掉钻现象^[6-8]。由于下卧软土层

收稿日期: 2012-10-16

基金项目: 湛江组结构性黏土的形成机制及区域工程地质效应基金资助(No.41072240); 区域海洋土特性基金资助(No.Y1100601Q02)。

第一作者简介: 沈建华, 女, 1980 年生, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: sjh200404@126.com

具有较强结构性使 1999 年在琼州海峡铁路轮渡工程北港（湛江侧）防波堤进行爆炸挤淤施工中爆填施工抛石层未能达到原设计标高，而南港却能按原始设计正常施工^[9-10]。雷州半岛坍塌统计数据表明，43%的坍塌是发生在湛江组地层上，其他不良地质现象如滑坡、水土流失、胀缩土地裂等均与湛江组结构性黏土有关^[11]。因此，加强对湛江地区结构性黏土地层的研究，对整个雷州半岛及周边地区的工程建设及地质灾害预防，有着重要的实际应用意义。

立足于湛江组地层在不同区域沉积环境的差异性，通过现场地质调查及工程钻探，对湛江组灰色黏土空间展布规律进行了全面分析，并构建了湛江组灰色黏土空间展布三维地质模型，实现了湛江组灰色黏土空间展布规律的可视化。

2 现场地质调查及工程钻探

为全面了解灰色黏土是否在整个湛江组地层中均有分布及在不同沉积环境中分布规律，笔者在雷州半岛的各个市、县、镇进行了现场地质调查，收集典型的地质露头信息，初步寻找湛江组灰色黏土的赋存规律，根据调查结果及相应的地质资料，综合雷州半岛地质构造及地形地貌，在各沉积相布置了相应的钻孔以鉴别灰色黏土层。

2.1 现场地质调查

现场地质调查过程及相关地质资料中的典型剖面露头简单概括图 1 为湛江市城市假日 E 区剖面，单向斜层理见图 2。



图 1 湛江市城市假日 E 区露头剖面
Fig1. Urban holiday E area section in Zhanjiang



图 2 单向斜层理
Fig2. Mono-directional inclined bedding

地层从上至下依次分布，层①耕植土 0.5 m；②杂色黏土夹多层褐黄色砂层 1.1 m；③杂色黏土与褐黄色砂互层 0.7 m；④灰白色中砂，单向斜层理发育 0.5 m；⑤紫红色黏土与灰黄色中粗砂互层 0.9 m；⑥紫红色黏土 0.8 m；⑦灰色黏土夹灰白色中砂 0.2 m；⑧灰白色中砂 0.9 m；⑨灰色黏土，水平层理发育，未见底。图 3 为百姓村剖面。



图 3 湛江市百姓村露头剖面
Fig.3 Baixing village section in Zhanjiang

地层从上至下依次分布为，层①填土 0.4 m；②灰黄色中砂层 1.0 m；③褐黄色粗砂含少量砾石 0.8 m；④铁质层 0.05 m；⑤紫红色，浅灰色等杂色黏土 1.2 m；⑥灰色黏土，水平层理发育，未见底。

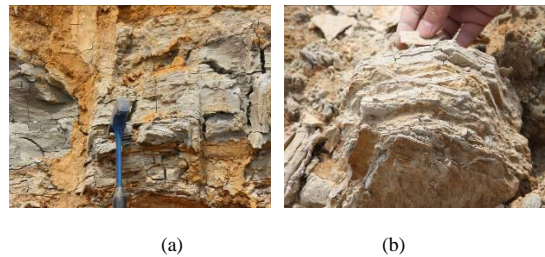


图 4 典型的灰色黏土，水平层理发育
Fig.4 The typical gray clay, horizontal bedding development

徐闻前山云仔坡露头剖面^[12]，层①上部浅红色、下部杂色黏土，顶部有 10~15 cm 的铁豆砂层 2.1 m；②黄褐色粉质黏土，下部为细砂，底部夹 0.5-1 cm 铁质粗砂层 2.3 m；③紫黄及灰白色等杂色微薄层状黏土，层面间粉砂 20.0 m；④上部紫红色，下部橙黄色间浅紫色粉砂 1.7 m；⑤紫色为主，次为黄色细砂，局部发育交错层理 0.45 m；⑥黄褐色、紫红色微薄层状黏土，层面间粉砂 1.4 m；⑦灰色带黄色中粗砂，交错层理发育 1.1 m；⑧浅紫及灰色微薄层状黏土，未见底。

从现有少量的地质露头发现，湛江组黏土层分

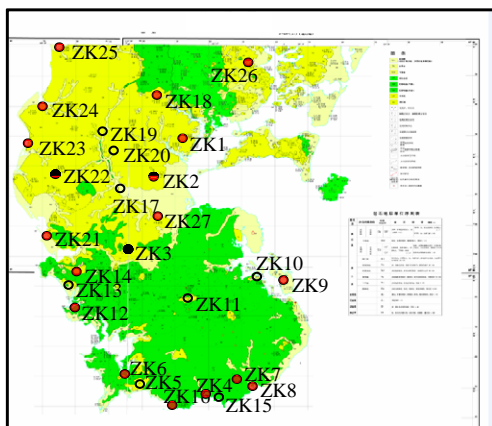
为杂色黏土及灰色黏土两类，两者在剖面上往往呈交替状出现，灰色黏土水平层理发育（见图 4），砂层中有较明显河流相斜层理、水平层理（见图 2），与上覆北海组之间普遍存在褐铁矿质砂砾层，见图 5。



图 5 北海组与湛江组不整合接触面上的铁质风化层
Fig.5 Iron-regolith in the unconformable contact between Zhanjiang and Beihai Formation

2.2 地质钻探

林晓东等^[13]根据矿物成分形态、表面微结构特征及相关试验数据的分析，将雷州半岛地区湛江组地层自北向南依次划分为河流相、河口相、浅海相、滨海相、河流相沉积。在此基础上，通过现场地质调查情况及分析现有地质资料，结合雷州半岛地区的地形地貌，区域地质构造，在调查区不同沉积相内共布置了 27 个地层钻孔，进行了地层钻探鉴别及取样。详细的地质钻孔布置见图 6。



● 控制孔；○ 鉴别孔

图 6 地质钻孔布置图
Fig.6 Geological drilling arrangement plan

3 灰色黏土空间展布规律

现场地调、钻探资料及现有的地质资料表明，湛江组地层在垂向上由多个下粗上细的沉积韵律组成；由于沉积环境的差异，在不同的地区灰色黏土

层的层顶埋深、地层厚度等均发生较大变化，灰色黏土空间展布规律随着湛江组地层沉积环境的变化呈区域性变化。

3.1 雷北河流相沉积区域

图 7 为本次地质钻探河口相钻孔地层剖面对比图。为便于比较灰色黏土在本区的分布情况，图中仅画出了灰色黏土的地层分布线（以下同）。图中钻孔资料表明：本区内灰色黏土地层厚度、层顶埋深自西向东、由北向南逐渐减小，东部钻孔揭露了湛江组多个沉积韵律，灰色黏土在垂向不同沉积轮回中厚度逐渐增大。湛江师范学院处钻孔在 23.5 m 孔深范围内，揭露灰色黏土地层达 3 处之多，在湛江地区地层形成环境复杂，地壳运动较为频繁。图中灰色黏土的分布深度均在建筑物地基基础受力影响范围内，其强结构性将产生一系列的岩土工程问题，如地基的不均匀沉降，基坑、边坡的稳定性等，对工程的建设有较大的影响。

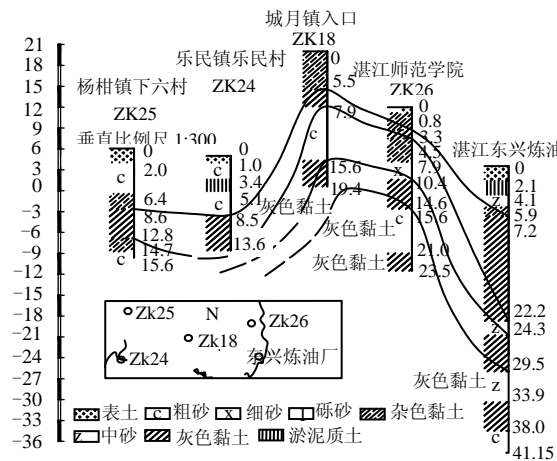


图 7 雷北河流相钻孔纵向剖面对比图(单位: m)
Fig.7 The longitudinal profile of river facies in the north of Leiqiu peninsula(unit: m)

在河流相沉积范围内，螺岗岭、赤泥岭、城里岭、笔架岭、边岭、湖光岩一带出露中更新统和上更新统的火山岩石崩岭组及湖光岩组，两者呈平行不整合接触。区域内火山喷为中心式喷发型，近火山锥厚度最大（达 184 m），向四周迅速变薄或尖灭^[14]。该文献中地质剖面表明，在其分布范围内，湛江组地层埋深较大，灰色黏土层均在建筑物基础受力影响范围外，结构性对工程无影响。

该区域除石崩岭组及湖光岩组岩层分布范围可忽略湛江组结构性黏土的影响，在其他区域均要考虑其结构性，并在工程勘察、设计、施工中应采取相应的措施。

3.2 河口相沉积区域

该区域分布范围较广，占整个雷州半岛的绝大部分面积，图 8、9 为该区域典型的横剖面及纵剖面。

从图 8、9 中可以看出，河口相沉积区域，灰色黏土的埋藏深度、地层厚度普遍要大于河流相沉积，地层起伏趋势基本上跟该区地形的分布趋势一致，均以雷中地区为中心向北向南逐渐抬高，沉积韵律由河流相的多个沉积韵律逐渐减少成一个不完整的沉积韵律，灰色黏土上部的杂色黏土层在部分地区缺失。图 9 剖面中西南方向北和镇和家村钻孔并未揭露灰色黏土层，根据已有地质资料^[15]北和镇南部地区在建筑地基基础受力影响范围内并未揭露灰色黏土层，可见在河口相沉积区域由北向南，由西向东结构性黏土对建筑地基产生的影响呈先增大后减小的趋势，并以雷中地区为中心向四周减小。该区灰色黏土埋深较河流相有所增大，但土层厚度增大。因此，该区除北和镇南部区域，灰色黏土对工程建设仍有较大影响，工程建设过程中应考虑灰色黏土的结构性，并采取相应的措施。

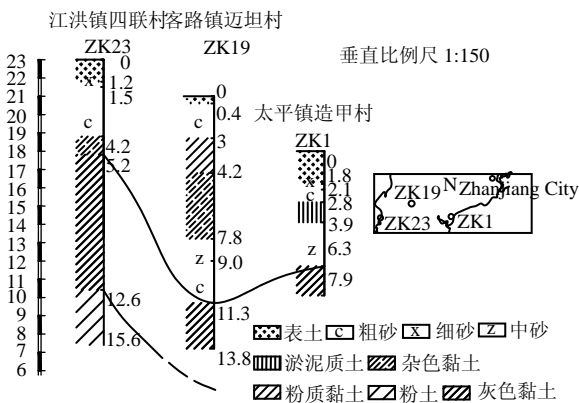


图 8 河口相钻孔横剖面对比图(单位: m)

Fig.8 The transversal profile of estuarine facies(unit: m)

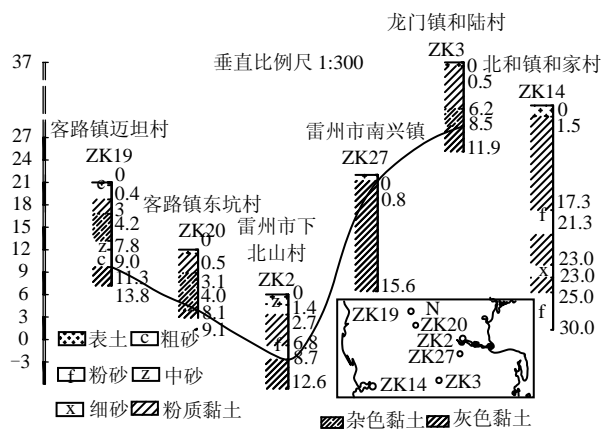


图 9 河口相钻孔纵剖面对比图(单位: m)

Fig.9 The longitudinal profile of estuarine facies(unit: m)

3.3 浅海相和滨海相沉积区域

雷州半岛南部火山是雷琼第四纪火山的重要组成部分，是南海北部大陆边缘在印度板块和欧亚板块运动与南海扩张影响下断裂活化产生的火山。从中生代燕山期到喜山期，雷州半岛发生了 10 期 56 回次的火山喷发活动，至全新世火山喷发活动仍未停止，形成了 50 多座火山，火山岩覆盖面积占雷州半岛总面积的 39%。早更新世湛江组时期为坡朗岭火山喷发期，地壳抬升，接受中更新世沉积物，中更新世晚期石峁岭期火山喷发，形成了大面积的玄武岩台地，石峁岭组岩层平行不整合于湛江组地层之上^[14]。

图 10 中剖面及现有地质资料表明，在石峁岭组岩层分布区域，岩层埋深较浅，部分地区直接裸露于地表，岩层厚度以火山口为中心，向四周逐渐减小。石峁岭-石板一带，以石峁岭为中心，向四周逐级下降，厚度一般大于 30 m，最大达 291 m。顶板覆盖厚 5~10 m，下伏火山碎屑岩和湛江组地层；加山岭一带，以加山岭为中心，呈近圆形分布，岩层厚度一般大于 15 m，最厚大于 67 m，总体厚度自火山锥顶往四周减薄，顶部风化层（覆盖层）厚度 0~5 m。底板与火山碎屑岩或湛江组接触^[12]。

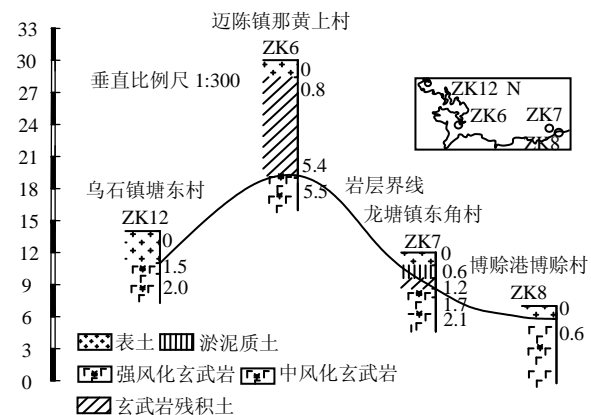


图 10 浅海相和滨海相钻孔纵剖面对比图(单位: m)

Fig.10 The longitudinal profile of Neritic and Littoral facies(unit: m)

图 11 为徐闻县城内钻井施工队钻穿石峁岭玄武岩后揭露的湛江组杂色黏土层，接触面出现明显的烘烤层。因此，本区内可以忽略湛江组灰色黏土的结构性对工程建设的影响。

3.4 雷南河流相沉积区域

本区内石峁岭组岩层逐渐尖灭，钻孔可揭露平行不整合于石峁岭组玄武岩的湛江组灰色黏土层，但灰色黏土埋深较大 (>16 m)，如图 12 所示。由图可见，在雷州半岛南部沿海河流相沉积区域内湛

江组结构性黏土对一般工程的影响不大，但重要工程仍要考虑其结构性的影响，采取相应的措施保证工程质量。



图 11 平行不整合于石崩岭地层下的湛江组地层
Fig.11 Zhanjiang Formation, disconformity under the Shimaoling layer

规律的三维地质模型，全面展示结构性黏土在雷州半岛的展布规律，实现湛江组结构性黏土空间展布的可视化^[16-19]。

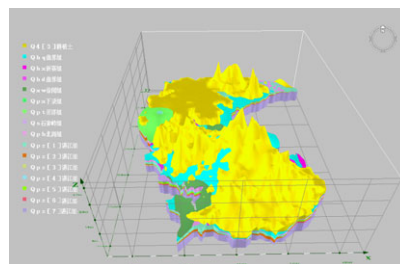


图 13 雷州半岛第四纪地层整体三维地质模型
Fig.13 3D geological modeling of Quaternary sedimentary in Leizhou Peninsula

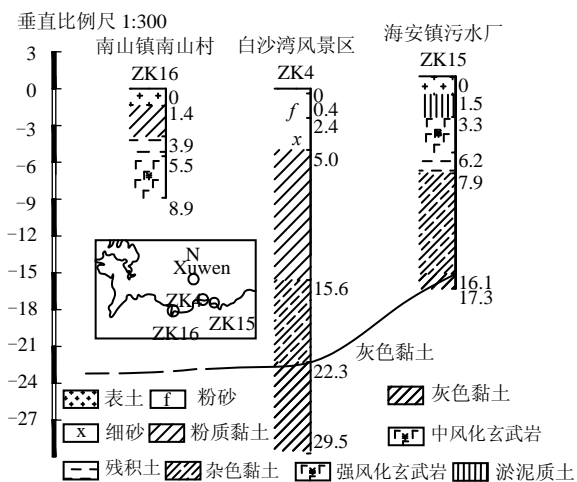


图 12 雷南地区河流相钻孔纵向剖面对比图(单位: m)
Fig.12 The longitudinal profile of river facies in south of Leizhou peninsula (unit: m)

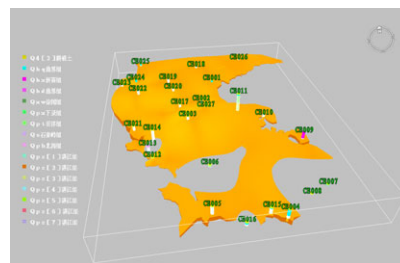


图 14 雷州半岛湛江组灰色黏土层
Fig.14 Gray clay of Zhanjiang Formation in Leizhou Peninsula

综上，湛江组灰色黏土层在整个雷州半岛均有分布，不同沉积相中灰色黏土层空间展布规律有所差异。灰色黏土的地层起伏趋势与地形起伏趋势一致，层顶埋深自西向东逐渐减小，自北向南由于受中更新世火山喷发作用的影响变化趋势先增大后减小；层厚度由北向南逐渐增大，且在不同沉积韵律中灰色黏土层的厚度，由下至上逐渐减小。

4 灰色黏土空间展布三维地质模型

湛江组灰色黏土层由于沉积环境的不同，不同区域内其空间分布规律不同，在实际工程中较难掌握其基本分布规律，难以对在建或拟建工程进行预判，减少灰色黏土结构性对工程的影响。为此，以三维地质建模及可视化理论为基础，采用基础 GIS 软件平台 MAPGIS 强大的三维可视化开发平台 MAPGIS-TDE 构建了湛江组结构性黏土空间展布

湛江组灰色黏土是湛江组地层中分布的一层典型的结构性土层，呈层状产出；根据其在雷州半岛的分布特性，湛江组灰色黏土层属于层状地质实体；由于收集到的地质信息有限，文中采用简单层状地质体基于钻孔数据的地质建模方法，根据雷州半岛钻孔地层数据信息，采用建模区域整体地层编号方法^[16-18]对地层进行编号处理，并根据中国科学院数据应用环境—SRTM 国际科学数据镜像服务系统提供 DEM 数字产品中的“SRTM90 米分辨率原始高程数据”提取岛内的高程等值线及边界线数据，用于建模时数据的插值及约束。图 13 为构建的雷州半岛第四纪地层三维地质模型，图 14 为模型中提取的湛江组灰色黏土层。

5 三维地质模型的应用

假设一线性工程贯穿于整个雷州半岛，途经不同沉积相分布区，在未经任何地质调查及现场钻探的前提下如何预先判断工程过经位置结构性黏土的分布状况，如层顶埋深、地层厚度及结构性强度大小等，为实际工程的勘察、设计、施工等提供结构性黏土的地层概况，预先准备应对措施，可大大提

高工程效率并节约工程费用。

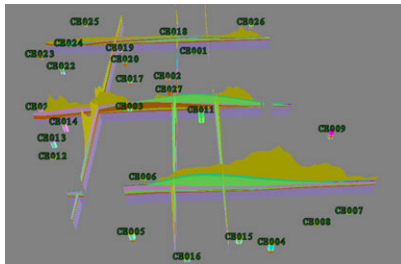


图 15 模型剖面格栅图

Fig.15 Profile grille figure of modeling

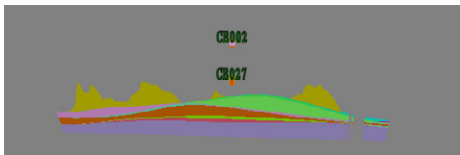


图 16 模型任意截面图

Fig.16 Some section of modeling

本文所建立的灰色黏土的三维地质模型，可沿工程分布线路区，根据需要在模型上进行任意方向任意剖面的切割（见图 15）。切割后可提取任意截面（见图 16）信息，查找不同区域结构性黏土层的层顶埋深、地层厚度及各物理力学参数的参考值，供建筑施工人员作为预先设计的参数指导。简单的切割，提取，查询即可获得结构性黏土的地层资料，为工程的预判提供了简单高效可行的方法，可较大程度的避免由于湛江组结构性黏土的强结构性给工程造成的一系列岩土工程问题，减少不必要的经济损失。

6 结 论

(1) 湛江组灰色黏土遍布于整个雷州半岛，在不同的沉积相中具有不同的空间展布规律，空间分布具有区域性差异。

(2) 灰色黏土的地层起伏趋势与地形起伏趋势一致，层顶埋深自西向东逐渐减小，自北向南由于受中更新世火山喷发作用的影响变化趋势先增大后减小；层厚度由北向南逐渐增大，并且在不同沉积韵律中灰色黏土层的厚度由下至上逐渐减小。根据灰色黏土的埋置深度分析了其对工程建设的影响，建议在实际工程建设中采取适当的措施，以避免黏土的结构对工程产生较大的影响。

(3) 构建湛江组结构性黏土空间展布规律三维地质模型，全面展示结构性黏土在雷州半岛的展布规律，实现湛江组结构性黏土空间展布的可视化，并对模型的应用进行了简单的介绍。

进一步研究将从灰色黏土的物理力学性质、微观结构、矿物成分等方面具体分析各区域灰色黏土，以全面了解灰色黏土的区域性特性，并进一步收集地层信息，积累更多数据资料，以提高模型的精确度。

参 考 文 献

- [1] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 34-45.
LI Zuo-qin, Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(1): 34-45.
- [2] 谭罗荣, 张梅英. 一种特殊土微观结构特性的研究[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(2): 26-35.
TANG Luo-rong, ZHANG Mei-ying. The research on microscopic structure properties of a particular soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(2): 26-35.
- [3] 张诚厚. 两种结构性黏土的土工特性[J]. 水利水运科学研究, 1983, 5(4): 65-71.
- [4] 张诚厚. 结构性黏土对湛江一区码头变形的影响[J]. 水利水运科学研究, 1985, 7(3): 123-132.
- [5] 罗鸿禧, 陈守义. 湛江灰色黏土的工程地质性质[J]. 水文地质工程地质, 1981, 25(5): 1-5.
LUO Hong-xi, CHEN Shou-yi. Engineering geological properties of Zhanjiang gray clay[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1981, 25(5): 1-5.
- [6] 姚珩珩, 夏远野, 刘胜娥. 海口地区第四系湛江组灰色黏土的工程地质特性[J]. 港工技术, 2001, 7(6): 54-55.
XIA Heng-heng, XIA Yuan-ye, LIU Sheng-e. The engineering geology of gray clay of Zhanjiang group of quaternary system in Haikou district[J]. **Port Engineering Technology**, 2001, 17(6): 54-55.
- [7] 陈书荣. 湛江灰色黏土的工程特性[J]. 西部探矿工程, 2006, (6): 30-31.
- [8] 吴卫华. 关于湛江灰色黏土的几个岩土工程问题[J]. 城市勘测, 2002, 17(4): 43-44.
- [9] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, (9): 82-88.
KONG Ling-wei, LÜ Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, 45(9): 82-88.

现机械化安全生产, 具有实用价值。

参 考 文 献

- [1] 范赞军, 张果, 肖木恩. 倾斜极薄软破矿体壁式削壁崩落采矿法研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(3): 4-6.
FAN Zhan-jun, ZHANG Guo, XIAO Mu-en. Study on resuing filling and wall caving method for inclined, extra-narrow, soft and broken ore vein[J]. **Mining Research and Development**, 2011, 31(3): 4-6.
- [2] 陈忠毅. 浅论缓倾斜极薄矿体削壁充填采矿法发展方向[J]. 黄金, 1992, 13(9): 13-17.
CHEN Zhong-yi. A talk about the orientation of the development of mining gentle dip and extra-narrow orebody by resuing-and-backfilling method[J]. **Gold**, 1992, 13 (9): 13-17.
- [3] 范永奎. 壁式爆力削壁充填采矿方法在峪耳崖金矿的应用[J]. 采矿技术, 2006, 6(3): 184-186.
- [4] 徐斌, 施勋偕. 倾斜壁式充填采矿法中电动铲运机的应用研究[J]. 矿业快报, 2000, 412(4): 3-6.
- [5] 王春武. 钢筋混凝土悬臂梁的构造设计[J]. 工业建筑, 2001, 31(12): 66-69.
WANG Chun-wu. Detailing of cantilever reinforced concrete beam[J]. **Industrial Construction**, 2001, 31(12): 66-69.
- [6] 郑林强. 钢筋混凝土悬挑梁构造分析[J]. 安徽建筑, 2000, 27(3): 33-34.
- [7] 邓飞, 梁惕平. 硐室取石充填法与削壁充填法围岩稳定性比较[J]. 采矿技术, 2010, 10(2): 11-12.
- [8] 樊明玉. 采场顶板稳定性与采场顶板监测技术研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2007, 59(1): 8-11.
FAN Ming-yu. Research on the stability and monitoring technology of stope roof[J]. **Nonferrous Metals(Mining)**, 2007, 59(1): 8-11.
-
- 上接第 336 页
- [10] 拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1879-1884.
TUO Yong-fei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Occurrence and engineering properties of structural soft clay in Zhanjiang area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1879-1884.
- [11] 李招文. 浅析雷州半岛区域新构造运动及不良地质现象[J]. 广东水利水电, 2002, 31(4): 76-79.
- [12] 广东省地质矿产局. 中华人民共和国湛江综合区域地质调查报告(1:50000)[R]. 广州: 广东省地质矿产局, 1989.
- [13] 林晓东, 宗永强. 湛江组沉积相特征[J]. 地层学杂志, 1990, 14(3): 195-202.
LIN Xiao-dong, ZONG Yong-qiang. Sedimentary facies of the Zhanjiang Formation[J]. **Journal of Stratigraphy**, 1990, 14(3): 195-202.
- [14] 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 等. 雷琼第四纪火山岩[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-7.
- [15] 广东湛江地址工程勘察院. 雷州市北和镇第二中学学生宿舍岩土工程勘察报告[R]. 湛江: 广东湛江地质工程勘察院, 2006.
- [16] 朱良峰, 潘信, 吴信才. 三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J]. 岩土力学, 2006, 27 (5): 828-832.
ZHU Liang-feng, PAN Xin, WU Xin-cai. Design and development of 3D geological modeling and visualization system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 828-832.
- [17] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化[J]. 地学前缘, 2000, 7(增刊): 271-277.
LI Pei-jun. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects[J]. **Earth Science Frontiers**, 2000, 7(Supp.): 271-277.
- [18] 朱良峰. 基于 GIS 的三维地质建模及可视化系统关键技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2005.
- [19] 陈国良. 基于地质断面的多约束复杂地质体重构技术研究及应用[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009.