

王蜜蕾,董杰,徐刚,等.青岛市滨海基岩地区地下空间地质结构特征[J].海洋地质前沿,2025,41(5):65-79.

WANG Milei, DONG Jie, XU Gang, et al. The characteristics of geostructures of urban underground space in coastal bedrock area of Qingdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(5): 65-79.

## 青岛市滨海基岩地区地下空间地质结构特征

王蜜蕾<sup>1,2</sup>,董杰<sup>2,3\*</sup>,徐刚<sup>1,2</sup>,宋维宇<sup>1,2</sup>,薛碧颖<sup>1,2</sup>,邹亮<sup>1,2</sup>,付佳妮<sup>2,3</sup>,邢淑晓<sup>2,4</sup>,窦衍光<sup>1,2</sup>

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266237; 2 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室,青岛 266101;

3 青岛地质工程勘察院,青岛 266101; 4 河南工业和信息化职业学院,焦作 454000)

**摘要:**青岛市大规模的城市建设亟需高效合理的地下空间开发。摸清青岛市地下空间地质结构特征,为城市地下空间的合理规划和开发提供更科学、可靠的依据,是实现城市可持续发展的重要途径。本文基于城市地质调查实测数据和收集的工程地质勘察数据资料,对青岛区域构造、地貌、断裂、岩土体结构及工程地质条件等梳理总结,并对其地下空间地质结构特征进行详细概述。结果表明,青岛市岩土体结构受基岩严格控制,影响着第四系沉积物的分布,其中岩体可划分为4类,第四系盖层可划分12层。基于数据构建的青岛市立体地质结构模型显示,下地壳的顶部埋深约12 km,上部地下空间开发的关键层范围为0~60 m,地表关键层的三维工程地质模型直观地展示其环境工程地质条件,便于提高对青岛市地质环境的整体认识,为后续地下空间开发建设提供科学依据。

**关键词:**青岛市;地质结构特征;地质结构模型;地下空间

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2024.146

### 0 引言

青岛市是山东省经济强市,生态宜居的人文城市,国家沿海重要中心城市和国际性港口城市。《青岛市国土空间总体规划(2021—2035)》<sup>[1]</sup>中提出青岛市行政管辖规划范围,陆域面积约11 295 km<sup>2</sup>,海域约12 240 km<sup>2</sup>。青岛市属于滨海山地型基岩城市,地处山东半岛的咽喉部位<sup>[2-3]</sup>,这种独特的区域自然地理位置奠定了青岛市良好的生态环境基础,同时也制约了青岛市城市空间发展的格局<sup>[4]</sup>。

近年来,城市建设以前所未有的规模和速度并

向着多功能方向发展,随着城市的不断开拓建设以及国家发展战略的深化实施,城市出现交通拥挤、空间紧张、环境问题突出、资源匮乏等问题<sup>[5]</sup>,现有的城市空间格局难以支撑其健康、持续的发展<sup>[4]</sup>。在城市建设与人口活动的双重影响下,城市所处的地壳表层受到很大的影响,亟需进行地下空间开发建设,以缓解城市发展压力。同时,合理开发利用城市地下空间对缓解地上交通压力、保护地上历史文化遗产、提高城市土地利用效率及改善生态环境等也具有重要意义<sup>[6]</sup>。地质背景和地质结构决定着城市地下空间开发利用的布局、规模以及深度,是城市地下空间规划、开发利用是否合理的重要基础<sup>[7]</sup>。因此,在研究城市地下空间开发利用之前,研究地下空间地质结构特征,以更好地促进城市发展建设与地质环境之间的协调性。

目前,由于对城市地貌特征、主要构造断裂、地下水条件、软土层分布等一系列地质问题的认识仍存在很大的不足<sup>[8]</sup>,在地下空间开发过程中频繁发生基坑坍塌和变形、地面沉降及突水等重大安全问题<sup>[9]</sup>。岩土体结构、地貌特征、岩石圈深部构造特征及区域构造特征等均是制约地下空间地质结构

收稿日期:2024-07-01

资助项目:自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室开放课题(BHKF2021Z06);中国地质调查局项目“青岛多要素城市地质调查”(DD20189230);山东省自然科学基金“纳米尺度内甲烷吸附相-孔隙水相互作用机制对含水页岩渗透性影响研究”(ZR2022QD096)

第一作者:王蜜蕾(1992—),女,博士,助理研究员,主要从事海岸带水文地质方面的研究工作。E-mail: wangmilei\_415@163.com

\* 通讯作者:董杰(1981—),男,博士,正高级工程师,主要从事水工环地质方面的研究工作。E-mail: 13853286966@163.com

的重要地质条件,正确识别这些地质要素是构建城市立体地质结构模型的关键<sup>[10]</sup>。

青岛是中国东部沿海的重要中心城市,正处于高质量建设发展的重要时期,科学、高效利用城市地下空间资源对优化青岛城市规划布局以及空间资源转型升级具有重要作用<sup>[11]</sup>。为适应青岛市国土空间总体规划,根据此次青岛市城市地质调查成果并结合已有工程地质勘察资料,综合考虑地貌、岩土体特征、构造断裂及岩石圈深部构造等地质条件,系统梳理概述了青岛市滨海基岩地区地质结构特征,构建了青岛市立体地质结构模型,在此基础上建立主要城区地表关键层的三维工程地质模型,对于地下空间开发建设具有重要的现实指导意义。

### 1 滨海基岩地区地质条件

地质体作为城市地下空间开发的承载场所,决定着地下空间开发的条件、困难和风险,城市地下空间的安全利用离不开对地质结构特征的细致研究。调查显示,尽管现阶段中国城市地下空间的建设和发展速度较快,然而整体进展仍然未能与城市发展的步伐相匹配。此外,利用效率较低,难以满足城市发展的要求。这主要是由于中国大部分城

市对其所处地质结构的掌握程度远未能满足地下空间建设的需要,能够支撑地下空间规划与开发的基础性地质工作相对薄弱<sup>[12]</sup>,尚不能完全满足支撑地下空间规划发展,因此我们需要构建地质结构指导中国城市地下空间开发利用。

### 1.1 区域构造特征

地球表层物质的组成和构造活动在很大程度上受到深部壳幔物质运动的直接影响<sup>[13]</sup>,因此,在城市地质结构模型的建立过程中,需要考虑壳幔结构特征。在中国大地构造分区中,除台湾省位于西太平洋岛弧带之外,其他省份自西向东可划分为青藏高原挤压造山带、中部克拉通块体和大陆裂谷带<sup>[14]</sup>。青岛属于东部大陆裂谷带,中生代以来岩石圈向拉伸减薄演化,目前约为70 km,陆壳厚度约30~35 km<sup>[15]</sup>,主要以右行走滑和伸展构造为主导<sup>[16]</sup>,地震活动频度相对低。

青岛地区大地构造单元位于华北地块东部,沂沭断裂带东侧胶辽隆起区和胶南-威海隆起区内<sup>[17]</sup>,可划分为三级构造单元<sup>[18]</sup>(图1)。中生代以来,构造活动表现比较强烈,在燕山运动晚期,太平洋(库拉)板块与欧亚板块洋(壳)-陆壳碰撞,引起中国东部地质构造的强烈变形,地壳也由晚元古代以来的收缩增厚,向拉伸减薄演化,并在郯庐断裂带的东

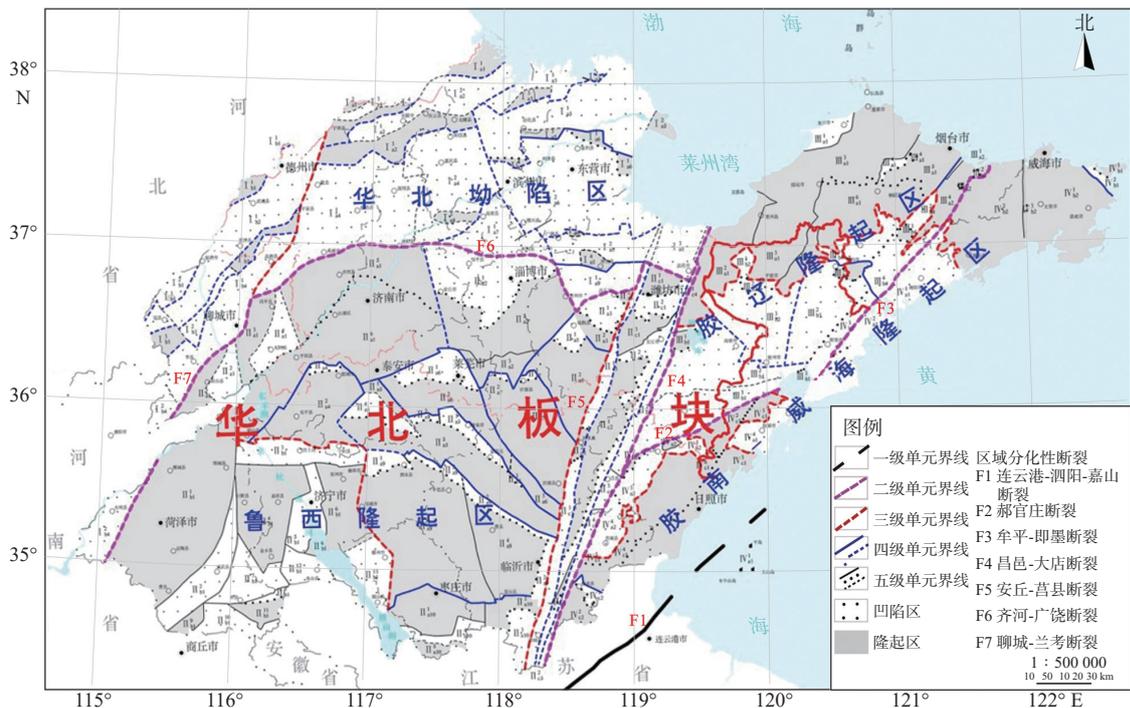


图1 山东省大地构造分区<sup>[19]</sup>  
Fig.1 Tectonic division of Shandong Province<sup>[19]</sup>

侧形成了“人”字型的拗陷盆地——胶莱盆地。盆地演化早期以沉降为主, 接受陆源碎屑物沉积, 形成了莱阳群沉积地层。盆地边缘的结晶基底进一步遭受剥蚀, 致使造山带的根部暴露出地表, 随着拗陷盆地的发展, 断裂活动、岩浆活动趋于活跃, 在盆地内有大量的中基性-中酸性火山岩喷发活动, 形成了青山群火山地层。燕山运动末期, 地壳继续减薄拉伸, 胶莱盆地继续沉降, 但沉降速度明显放慢, 在盆地内沉积了以陆源细碎屑为主的王氏群地层, 同时, 火山活动向偏碱性演化, 喷发强度减弱, 在王氏群沉积过程中夹有小规模的橄榄玄武岩岩浆喷发。

## 1.2 滨海基岩区地貌条件

城市不仅是由人为地貌作用形成的建筑群体, 而且其演进与地表形态密切相关<sup>[8]</sup>。城市的形成和后续发展受到自然地貌的直接制约, 通过深入研究城市与地表形态的相互关系, 能够更好地引导城市的可持续发展, 实现城市空间的优化利用。这也为城市规划和决策者提供了科学而可行的依据, 促进城市的健康、有序发展<sup>[18, 20]</sup>。

青岛市发育多种地貌形态, 如山区侵蚀构造地貌、剥蚀地貌、山前-山间-滨海堆积地貌等。在中生代时期, 青岛地貌轮廓的形成受到印支运动和燕山运动的影响<sup>[21]</sup>, 主要表现为冲积及洪-冲-海积平原区、侵蚀-堆积平原区、侵蚀剥蚀高丘陵区、侵蚀剥蚀低丘陵区、中切割断块低山区和侵蚀剥蚀低山区<sup>[22]</sup>。根据“1:25 万青岛幅海洋区域地质调查(试点)”项目的部分成果<sup>[23]</sup>, 绘制青岛市地貌图(图 2)。如图所示, 冲积及洪-冲-海平原区的地理分布主要集中于胶莱盆地和滨海山前地带, 平均海拔为 20~50 m, 受海洋作用影响, 表层主要由冲积物和海积物构成, 厚度一般在 30 m 以下, 这些平原地区地形起伏整体上相对较低, 地势平缓; 侵蚀-堆积平原区则主要位于胶莱盆地边缘<sup>[24]</sup>, 以孤立残丘零星状分布, 相比于冲积平原, 侵蚀-堆积平原区的海拔范围较广, 约为 20~100 m, 基面岩性以碎屑岩为主, 而表面的堆积物相对较薄; 在胶北和胶南低山区外围, 构造剥蚀地形表现为由强烈风化的变质岩和侵入岩所构成的低山丘陵, 其海拔介于 200~400 m<sup>[25]</sup>, 地形起伏明显。在地形剖面上, 上游地区呈现出深切切割, 呈“V”字型特征, 而下游谷宽呈“U”字型, 整体切割深度约为 200 m<sup>[26-27]</sup>; 强切割断块中山主要分布于崂山地区, 其崂顶海拔高达 1 133 m, 由中生

代低侵入岩组成; 此外, 中切割断块低山区和侵蚀剥蚀低山区的分布区域主要集中于胶北和胶南的隆起区核心, 同时覆盖了崂山区东侧的广大地域。这些区域的海拔维持在 400~800 m, 部分山峰海拔甚至超过 800 m。这些中低山区地处隆起构造强烈活动区, 经历了长时间的构造运动和地质切割, 其切割深度约为 200~300 m, 反映了地壳变动的复杂历史<sup>[22]</sup>。

## 1.3 青岛市主要断裂

如图 3 所示, 青岛市断裂构造比较发育, 以 NE、NNE、NEE 和 NW 向 4 组断裂构成基本构造格架<sup>[23, 28-30]</sup>。位于胶北隆起区西部的 NNE 向郯庐断裂带和东部的 NE 向牟平-即墨断裂带, 是控制青岛市断裂方位及发育程度的两大主要断裂系统。其中, NE 向断裂规模大, 且多期活动, 成为控制青岛主城区地质构造演化和近代地貌形态与轮廓最为发育的断裂体系(表 1)。自古近纪以来, 区域内的地质演化相对稳定, 主要体现在整体性较稳定的断块隆起。虽然区内新构造运动的整体性抬升幅度不大, 但在特定的构造带内新构造运动相对较强烈, 这种局部性的构造运动可能与地下构造单元的复杂性和差异性有关。崂山隆起作为区内显著构造单元, 呈现出一定的间歇性特点<sup>[31-32]</sup>。

### (1) NE 向断裂

该组断裂隶属于“牟平-即墨断裂带”<sup>[23, 33]</sup>, 其总体走向呈 NE40°, 局部变化为 30°~50°。据填图资料可识别出 14 条, 以沧口、劈石口、山东头 3 条断裂最具典型。

沧口断裂主要分布于青岛市中部, 从海阳朱吴延伸至沧口。沧口断裂自三标山穿越崂山张村延伸至浮山所, 主要集中在中更新世晚期活动。断裂属海阳劈石口断裂的南延部分, 主要发育断层角砾岩和碎裂岩。已有研究表明, 沧口断裂最早可追溯到中生代早期, 最后一次断裂活动在中更新世中晚期。

劈石口断裂起点位于三标山南部, 沿途穿过崂山花岗岩地区, 最终延伸至浮山所附近, 全长约 28 km。该断裂整体倾向为 NW 向, 走向主要呈现为 40°—45°, 倾角可达 80°, 沿断裂带发育有煌斑岩脉和正长岩岩脉<sup>[34]</sup>。

山东头断裂延伸路径为王哥庄-汉河村-山东头, 全长约 30 km。该断裂整体倾向为 NW 向, 走向表现为 40°—45°, 倾角约为 80°, 该断裂带在空间尺度

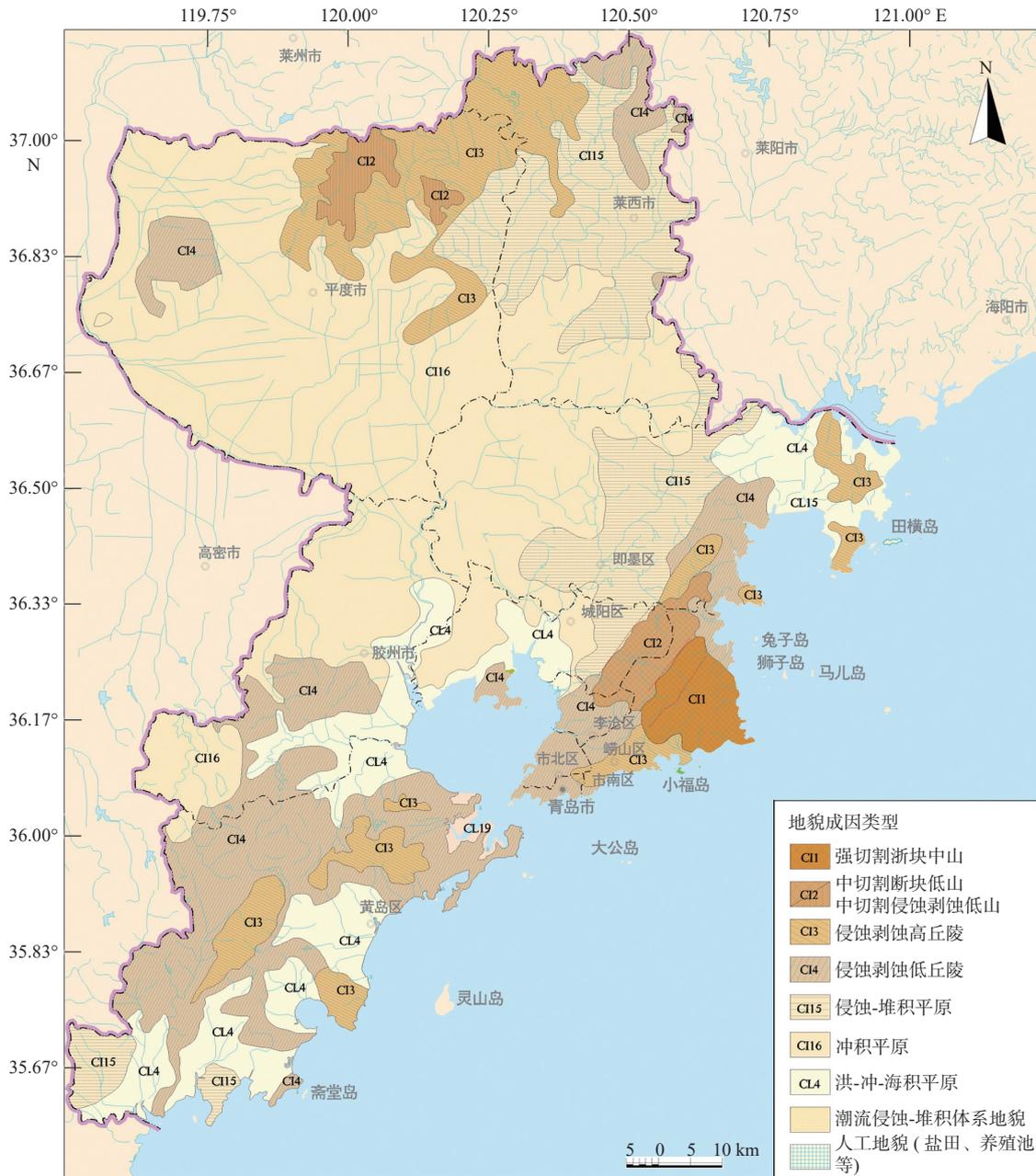


图2 青岛市地貌图<sup>[23]</sup>

Fig.2 Geomorphological map of Qingdao<sup>[23]</sup>

上具有多样性,宽度变化范围在几米至几十米之间,断裂均发育崂山期花岗岩<sup>[35]</sup>。

(2) NNE 向断裂

NNE 向断裂自海阳县郭城延伸至即墨市南部,为郭城至即墨断裂的南延部分,断裂带上、下盘地层分别为王氏群和青山群地层、青山群火山岩系<sup>[36]</sup>,大部分被第四系覆盖。断裂带宽度从几十米到几百米不等,破碎带发育有糜棱岩、断层泥、构造透镜体、擦痕等<sup>[37]</sup>。断裂最新的活动时代可以追溯至第四纪中更新世,自晚更新世以来则没有再次活动迹象。

(3) NW 向断裂

胶县断裂(五里堆断裂):该断裂为芝兰庄-南庄断裂带中的一段主要断裂,全长约 75 km。断裂呈 EW 向分布于场区南侧,西端自胶州城北,东端在南庄附近被 NNE 向的大沽河断裂错断,沿断裂带分布水泉,并形成不明显陡坎。沿走向呈波状弯曲。断裂位移距离较大形成红土崖组和胶州组界限,上盘分布胶州组正常沉积碎屑岩,以碎裂岩和泥岩为主;下盘为红土崖组火山喷发熔岩,以块状玄武岩为主。航磁平面图显示与断裂同方向的磁场负异常带。



空间的开发深度超过其基岩面,可能会对基坑开挖、隧道掘进施工等造成较大的阻碍<sup>[38-40]</sup>。对城市岩土体的工程地质特征进行系统分类,旨在深入了解和分析不同地质条件下岩土体的特性,为合理有效的地下空间开发利用提供科学依据<sup>[13]</sup>。

### 2.1 工程地质分区及特征

青岛市出露的地层除第四纪地层以外,主要为中生代白垩纪地层和古元古代荆山群、粉子山群地

层,新生代古近纪五图群地层为隐伏地层,岩土介质划分为岩体和土体两大类。根据青岛市地形地貌、岩土体工程地质特征,青岛市主城区可分为构造侵蚀剥蚀区(I区)、山麓斜坡区(II区)、河流侵蚀堆积区(III区)、滨海堆积区(IV区)和人工堆填区(V区)<sup>[41-42]</sup>,工程地质分区如图4所示。在此基础上,依据岩土体的力学性质及成因特征等差异,将I—IV区分别划分为2个亚区(表2)。

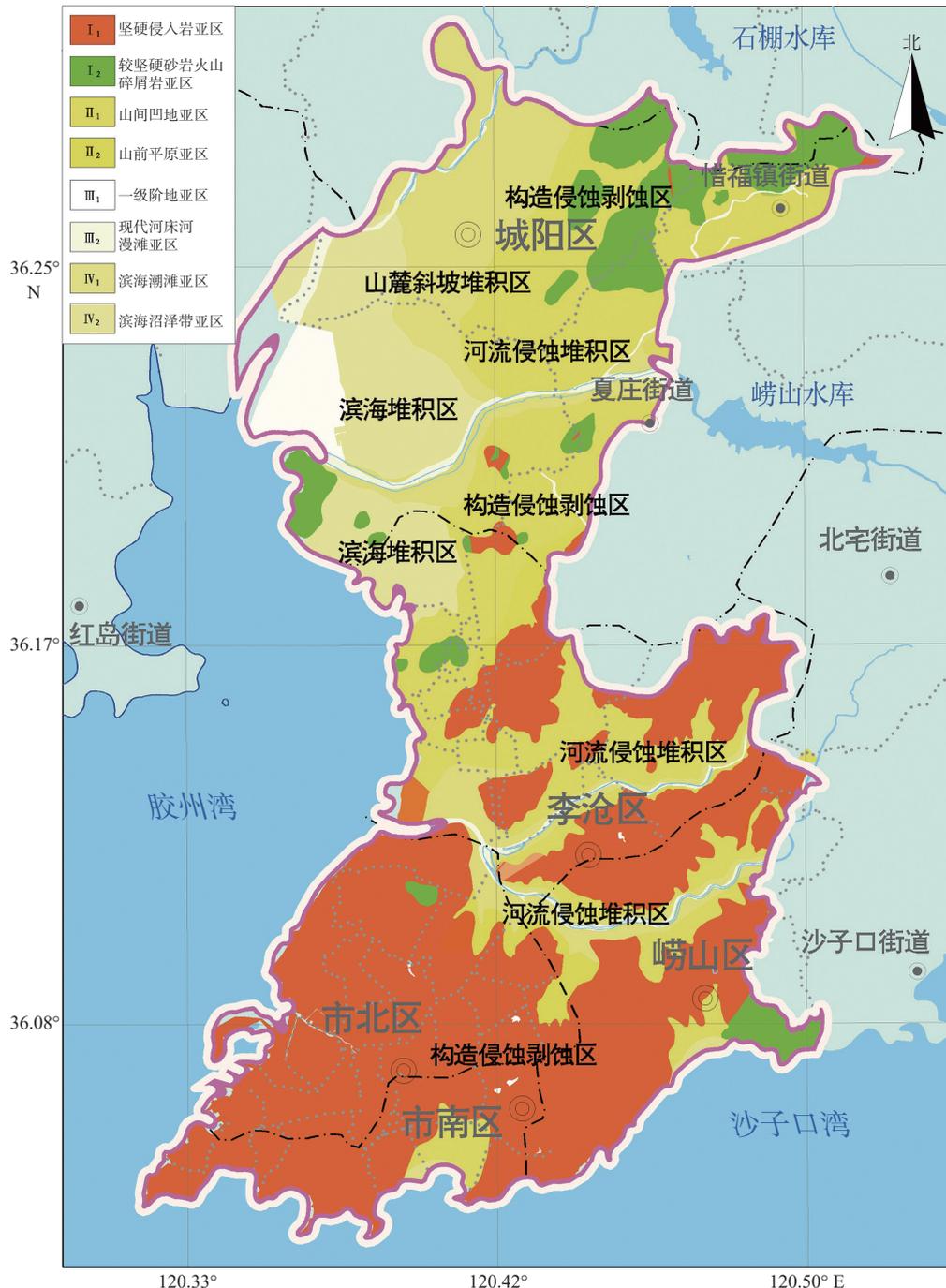


图4 青岛市主城区工程地质分区

Fig.4 Geo-engineering zoning in main urban area of Qingdao

表 2 青岛市主城区工程地质分区

Table 2 Geo-engineering zoning in main urban area of Qingdao

代号	工程地质分区	地貌特征	亚区代号	工程地质亚区
I	构造侵蚀剥蚀区	中山、低山、丘陵、准平原	I <sub>1</sub>	坚硬侵入岩亚区
			I <sub>2</sub>	较坚硬砂岩火山碎屑岩亚区
II	山麓斜坡堆积区	堆积缓坡、山间凹地	II <sub>1</sub>	堆积缓坡亚区
			II <sub>2</sub>	山间凹地亚区
III	河流侵蚀堆积区	河床河漫滩、一级阶地	III <sub>1</sub>	一级阶地亚区
			III <sub>2</sub>	现代河床河漫滩亚区
IV	滨海堆积区	滨海沼泽带、滨海潮滩	IV <sub>1</sub>	滨海潮滩亚区
			IV <sub>2</sub>	滨海沼泽带亚区
V	人工堆填区	/	/	/

## 2.2 岩体结构特征

青岛市岩体依据岩石的抗压强度(结构)和软化系数划分为块状层状坚硬岩类岩体、碎裂半坚硬岩类岩体、散体软弱岩类岩体(表 3)。<sup>①</sup>散体软弱岩类岩体:是城市地下工程中常见的岩土类型,其形成主要由于风化作用进而导致岩石颗粒间的连接受到削弱和破坏,产生次生黏土矿物,影响了岩

体本身的强度和稳定性<sup>[43]</sup>,根据风化程度,可以划分为强风化层、中风化层和微风化层,主要分布于黄岛、薛家岛以南区域和大户家-柳花泊一线。<sup>②</sup>碎裂半坚硬岩类岩体:岩浆岩受到同期或后期构造的影响而产生复杂的断裂破碎面,主要为花岗岩和玄武岩,大涧、东李村南山、薛家岛北东地区常有分布,楼山和城阳一线零星分布<sup>[44]</sup>。<sup>③</sup>块状层状坚硬岩类岩体:广泛分布于崂山与小珠山一带。

表 3 岩石强度分类

Table 3 Classification of rock strength

强度类别	抗压强度/MPa	软化系数	岩石类型
块状层状坚硬岩类岩体	80~100	>0.8	花岗岩为主,次为角闪石岩和闪长(玢)岩
碎裂半坚硬岩类岩体	30~80	0.6~0.8	花岗岩、玄武岩、流纹岩、砂岩
散体软弱岩类岩体	20~30	<0.6	风化的花岗岩及玄武、安山岩、片麻岩、片岩、糜棱岩

## 2.3 土体结构特征

青岛市所处地区的第四纪沉积层形成于晚更新世中期之后,其发育过程受到多种因素共同影响,呈现出复杂多样的成因机制,主要包括陆海相沉积、海相沼泽化、相冲洪积、陆相沼泽化和人工堆积等<sup>[41]</sup>。可细分为中更新统,上更新统的山前组、大站组、楼山组,全新统的临沂组、沂河组和胶州湾组,厚度变化介于 0~29.6 m,平均厚度约 13 m。第四系多见于地形绝对标高 100 米以下,面积约 500 km<sup>2</sup>。在绝对标高 20 m 以下较大河流的中下游和山前地带,第四纪沉积层厚度约为 10~20 m,最厚可达 25~30 m。第四系覆盖物之下主要为中生代燕山晚期的艾山式花岗闪长岩和崂山式花岗岩<sup>[45]</sup>。胶州湾周边地区缺少第四纪沉积层,中生界白垩系和古元古代变质岩系地层直接出露地表。

青岛市土体根据物质组成和物理力学性质进

行分类,包括中粗砂、粉土、粉质黏土以及特殊土体等。中粗砂呈单粒结构,石英、长石、云母等原生矿物为其主要组成成分,含砾量介于 6%~22%,局部地区黏土含量较高,可达 20% 左右。这种土体强透水性强、低压缩性、高抗剪强度等特点,但密实度较差,承载力 < 140 kPa<sup>[46]</sup>;粉土指粒径 > 0.075 mm 的颗粒含量不超过总质量的 50% 且 I<sub>p</sub> ≤ 10 的土<sup>[47]</sup>;粉质黏土在青岛分布广泛,部分含有淤泥成分。

青岛特殊土体主要有填土和软土,其中人工填土根据物质组成和堆填方式的不同,可以分为素填土和杂填土 2 种类型,素填土厚度变化较大,主要成分为天然土石和岩石碎屑等,抗压强度介于 80~100 kPa;杂填土厚度不稳定,主要成分为建筑、工业和生活废料及垃圾,松散且强度较低<sup>[48]</sup>,抗压强度一般 < 80 kPa。软土是一种细粒土,具有大孔隙,高含水量,易压缩和较低强度等特点,包括淤泥和淤泥质土,有机含量分别 > 8% 和 > (5%~8%)<sup>[49]</sup>。

### 2.4 青岛市岩土体总体结构特征

总结青岛市岩土体结构(图5),可以得出以下结论:区内岩土体结构、地貌单元划分以及第四系沉积物的分布均受到基岩总体控制<sup>[50]</sup>。在市区范

围内,裸露的基岩形成了低山丘陵地貌,其风化产物构成了陆源沉积物和海相沉积物的主要成分<sup>[49]</sup>;同时,又与第四系沉积区存在明显的地质分界线,第四纪沉积层制约着该区地下水资源、浅层地温能资源以及渣土资源的分布。

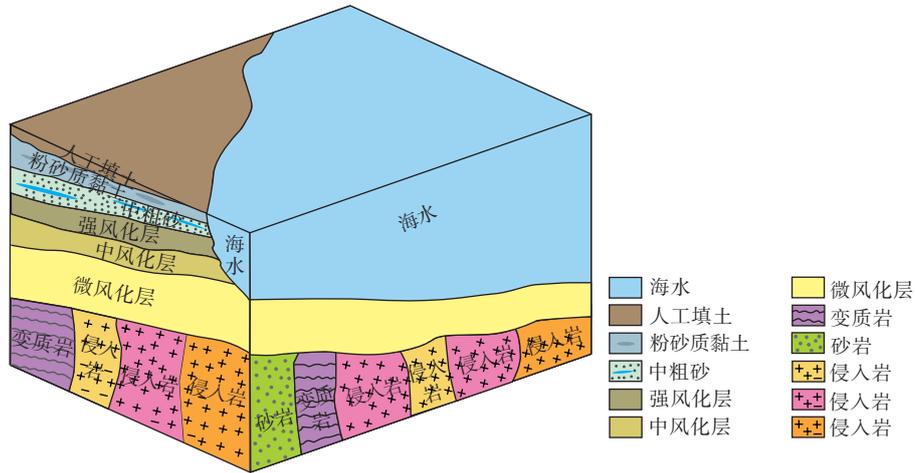


图5 青岛市岩土体立体结构示意图

Fig.5 Structure of rock and soil mass in Qingdao

## 3 青岛市地质结构模型

### 3.1 地质结构类型

地貌形态是地球表层系统作用的直接反映,与地球内部构造活动有着密切的联系。表层岩土体是城市地质结构的关键层,受地貌部位直接控制,因此城市地质结构应以其所处地貌单元为基础进行一级划分;并在一级划分的基础上,再考虑多种因素进行二级划分。其中,大地构造环境涉及到城市所处区域的板块运动、地壳变形等动力学过程,是至关重要的因素;此外,还需要对活动断层、壳幔及基底特征和潜在震级大小等因素进行分析。在此基础上,对城市地质结构进行详细分类<sup>[13]</sup>(图6)。青岛地貌部位属于滨海山地区,部分区域地表覆盖物相对较薄,主要由中粗砂、粉土、粉质黏土及原岩风化的碎屑组成,其他区域基岩岩体结构主要以基岩为主。据此可将青岛市城市结构划分为单层结构(以基岩为主)和双层结构(由大量中粗砂、粉土、粉质黏土及岩石组成)2类<sup>[51]</sup>。

### 3.2 地质结构特征

青岛地表关键层主要为埋深约为 60 m 的上部

盖层和风化层,上部盖层主要是第四纪砂性土、粉土与黏性土沉积的疏松地层,根据钻探揭示,青岛市盖层体可大致划分 12 层<sup>[52]</sup>。表土层分布广泛,厚度一般 < 3 m,其承载力 < 80 kPa。第一砂层主要分布在环胶州湾内部及其周边滨海沙滩地区,涵盖了沙滩、砂坝、浅滩、以及海蚀堆积形成的一级阶地等<sup>[38]</sup>。第一土层和第三砂层主要分布在河床、河漫滩、河流两岸以及沧口区洪冲积平原的顶部。第二砂层和第二土层主要分布在环胶州湾的滨海潮滩、水下浅滩、河流入海口三角洲地带,以

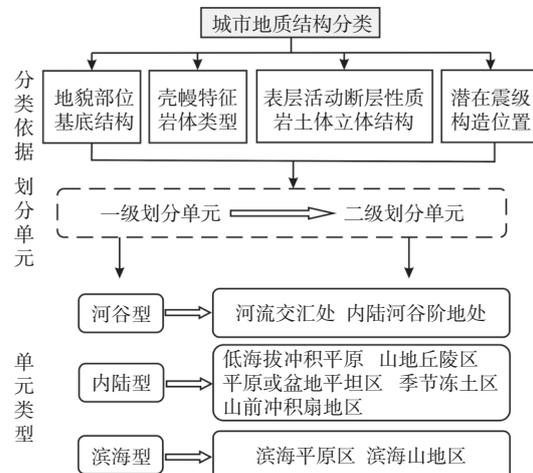


图6 城市地质结构分类指标<sup>[13]</sup>

Fig.6 Classification index of urban geo-structures<sup>[13]</sup>

表 4 青岛市盖层划分表

Table 4 Classification of overlying strata in Qingdao

盖层	成因类型	主要岩性
表土层	人工填土	人工填土
第一砂层	陆相洪冲积层	细砾、极粗砂
第一土层	陆相洪冲积层	黏土
第二砂层	海相沼泽化层	细砾、极粗砂
第三砂层	陆相洪冲积层	细砾、极粗砂
第二土层	海相沼泽化层	黏土
第三土层	陆相洪冲积层 <sup>1</sup>	黏土
第四砂层	海相层	细砾、极粗砂
第五砂层	陆相洪冲积层	粗砂、极粗砂
第四土层	陆相沼泽化层	黏土
第五土层	陆相洪冲积层	黏土
第六砂层	陆相洪冲积层	极粗砂

及市南区、崂山区、黄岛区的滨海平原。第三土层分布在现代河流堆积一级阶地、河漫滩上部, 以及沧口、城阳洪冲积平原的中上部。第四砂层主要分布在滨海潮滩、水下浅滩、砂脊以及环胶州湾海岸、覆盖市南区、崂山区等滨海区域。相比之下, 第五砂层则位于现代河流堆积的一级阶地、河漫滩相的下部, 以及沧口、城阳洪冲积平原的中上部。第四土层分布较为复杂, 受到后期侵蚀作用的改造, 零星分布于缓坡低凹处、河流一级阶地河漫滩相之下部顶面, 以及胶州湾及滨海区部分区域。第五土层主要分布于现代河流、河漫滩相的底层, 以及胶州湾内堆积区的底部、沧口和城阳平原区中下部<sup>[53]</sup>。第六砂层分布区域涵盖了沧口洪冲积平原的底部以及白沙河中下游<sup>[54]</sup>。风化层以花岗岩为主, 可见角闪石岩及闪长(玢)岩、玄武岩、流纹岩、片麻岩、糜棱岩等, 可大致划分为强风化层、中风化层和微风化层<sup>[55]</sup>, 风化壳厚度一般为 30~60 m, 其中强风化带厚度为 5~14 m。

### 3.3 立体地质结构模型

21 世纪之前的城市建设主要集中于水平方向和中垂直方向的地上扩展<sup>[6]</sup>。21 世纪以来, 为深入“向高空要空间, 向地下要空间”理念、提高城市功能、缓解城市资源压力及改善城市生态环境, 城市立体化建设得到各级响应。为了更好地指导青岛市合理开展区域内地下空间的开发利用, 构建其地质结构模型为城市发展服务(图 7)。

青岛市地处山东半岛南端, 在内外力地质作用

条件下形成山地丘陵。全区地势呈东高西低中间凹陷, 青岛市除河流两侧、山前河流入海及准平原地区处被第四系松散层所覆盖, 主要为陆相、海相沉积, 其他地区为基岩裸露。青岛市位于东部大陆裂谷带, 其深部特征表现为减薄的陆壳与岩石圈, 基底属于中朝准地台的一部分<sup>[13]</sup>。表层发育多条 NE、NEE、NNE 构造系, 其中 NE 向断裂构成了青岛市城市断裂的主要框架<sup>[44]</sup>。根据 1:25 万青岛幅海洋区域地质调查项目的重磁反演数据<sup>[23]</sup>, 结合青岛市综合地质条件, 可将青岛市地质结构模型概括为: 青岛地区莫霍界面位于约 30 km 深处, 沉积层与莫霍面之间为中下地壳<sup>[56]</sup>, 其顶部埋深约 12 km, 基底顶面埋深约 60 m, 基底结构多处断裂交错分割, 呈现出相对破碎的地质格局, 分为胶莱盆地、胶南隆起、胶北隆起和济阳拗陷。上部地表关键层范围为 0~60 m, 青岛市第四纪沉积层埋藏浅, 仅大小河流中下游河谷平原分布有第四系孔隙水, 崂山等地区花岗岩风化层内不均匀分布裂隙水<sup>[57]</sup>, 青岛市地下水水力性质基本为潜水, 局部地段在高水位时具弱承压性<sup>[58]</sup>。

### 3.4 三维地质模型

青岛地形起伏大、基岩露头较多、岩性多为岩体, 传统的基于钻孔的层状地质建模方法在此效果欠佳。针对青岛丘陵地形地貌, 基于青岛市立体地质结构模型, 为了实现工程地质三维地质模型的快速半自动构建, 根据收集的工程勘察、地铁、海底隧道、地质调查等数据, 标准化 1 116 个钻孔, 补充图切剖面 19 条, 结合第四系相关数据, 构建严格自上而下的标准层序, 依次计算每一地层的地质分区<sup>[59]</sup>, 构建了青岛市主城区地表关键层的三维工程地质模型, 模型的爆炸显示能够立体化清晰地展示地层结构(图 8)。

模型直观形象地勾勒地形地貌特征, 突出滨海基岩型城市的地质成因特点, 较好地指示了高倾角岩脉和破碎带空间形态。此外, 通过漫游、切割、开挖等功能, 三维模型可对城市工程建设中的隧道、地铁、地基开挖等提供可视化的三维动态模拟, 从而参与项目全生命周期管理, 为城市规划建设提供参考依据<sup>[60-61]</sup>, 如本模型对青岛市邮轮母港启动区相关设计与施工<sup>[62]</sup>、前海沿线地下交通规划论证等<sup>[51]</sup>提供了针对性指导, 未来仍需在工程实践中继续论证模型的可靠性。

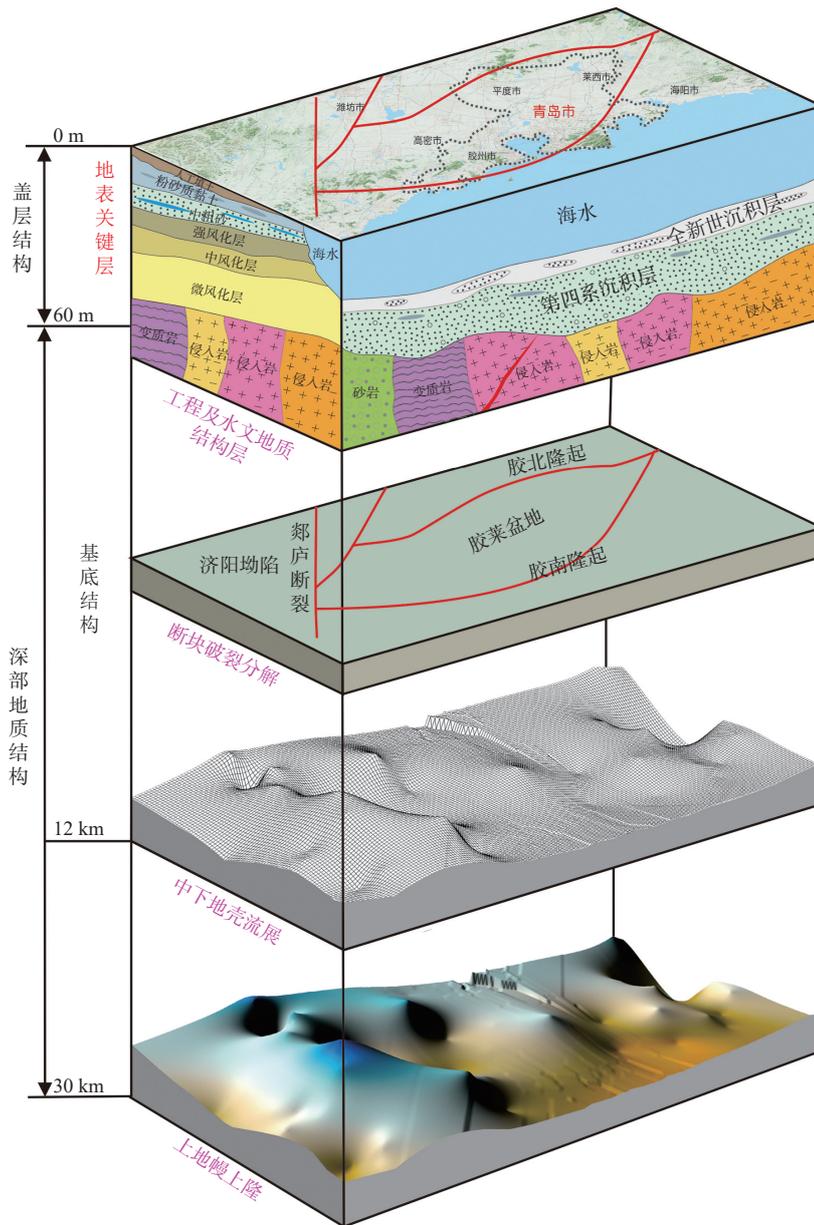


图7 青岛市立体地质结构模型

Fig.7 The 3D geo-structural model of Qingdao

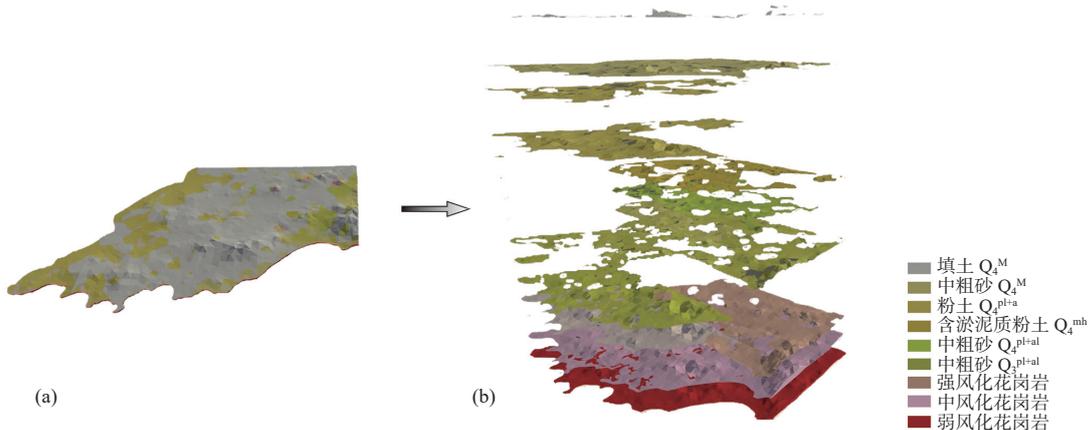


图8 青岛市主城区三维工程地质模型 (a) 及爆炸显示 (b)

Fig.8 3D engineering geological structure model of Qingdao main urban area (a) and stratigraphic explosion (b)

## 4 结论

青岛市为典型的滨海基岩型城市, 发育有山区侵蚀构造地貌、剥蚀地貌、山前-山间-滨海堆积等地貌, 郯庐断裂带(NNE 向)和牟平-即墨断裂带(NE 向)主要控制了青岛市断裂的方位及发育程度, 其中 NE 向断裂控制了主城区地质构造演化及近代地貌形态与轮廓。青岛市岩土介质划分为岩体和土体 2 大类, 其中岩体可分为 4 大类型, 第四系盖层可大致划分 12 层, 特殊土体主要有人工填土和软土。

通过对青岛市区域地质、岩土体结构特征等的分析, 构建了城市地质结构模型, 指出青岛市中下地壳的顶部埋深约为 12 km, 上部地表的关键层范围为 0~60 m, 第四纪沉积层埋藏较浅, 地下水以孔隙潜水为主。并通过地表关键层的三维工程地质模型, 直观地展示青岛市主城区的地层结构特征, 服务于城市规划顶层设计、工程建设、地铁隧道选址施工等, 为青岛市地下空间开发利用、地质灾害防治、环境保护和国土空间资源管控等提供地质数据支撑和辅助决策。

### 参考文献:

- [1] 青岛市自然资源和规划局. 关于对《青岛市国土空间总体规划(2021-2035年)》(草案)公开征求意见的通知 [EB/OL]. [2021-07-27]. [http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/zygh/gkml/gzxx/202107/t20210726\\_3191196.shtml](http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/zygh/gkml/gzxx/202107/t20210726_3191196.shtml).  
Qingdao Natural Resources and Planning Bureau. Notice on soliciting public comments for <the Draft of Qingdao Territorial Space Master Plan (2021-2035)> [EB/OL]. [2021-07-27]. [http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/zygh/gkml/gzxx/202107/t20210726\\_3191196.shtml](http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/zygh/gkml/gzxx/202107/t20210726_3191196.shtml).
- [2] 姜岩. 青岛主城区香港中路沿线地下空间开发利用研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2017.  
JIANG Y. Development and utilization of unerground space along the middle Hongkong Road in Qingdao main city[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2017.
- [3] 张志华, 曾林, 陈宇乐, 等. 移动背包扫描在青岛绿色建设科技城地下空间普查中的应用与探索 [J]. 建设科技, 2018(18): 18-22.  
ZHANG Z H, ZENG L, CHEN Y L, et al. Application and exploration of mobile backpack scanning in underground space survey of green construction science and technology city in Qingdao[J]. Construction Science and Technology, 2018(18): 18-22.
- [4] 潘丽珍, 李传斌, 祝文君. 青岛市城市地下空间开发利用规划研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(7): 1093-1099.  
PAN L Z, LI C B, ZHU W J. Underground space exploitation planning of Qingdao city[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(7): 1093-1099.
- [5] 薛碧颖, 窦衍光, 林曦, 等. 青岛城市规划区不同岩性氡浓度差异及其控制因素 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 10-16.  
XUE B Y, DOU Y G, LIN X, et al. Bedrock radon concentration in the Qingdao urban planning area and its bearing on lithology[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(9): 10-16.
- [6] 许圣泽. 城市地下空间开发利用规划研究: 以青岛市主城区为例 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.  
XU S Z. Study on the planning of city underground space: taking Qingdao main city for example[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2010.
- [7] 贾永刚, 谭长伟, 刘红军, 等. 青岛城市工程地质 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1995.  
JIA Y G, TAN C W, LIU H J, et al. Urban Engineering Geology of Qingdao[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1995.
- [8] 邹亮, 窦衍光, 胡睿, 等. 青岛古镇口创新示范区土地质量评价及规划利用 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 49-59.  
ZOU L, DOU Y G, HU R, et al. Land quality evaluation and development planning for the Guzhenkou innovation and development femonstration region of Qingdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(9): 49-59.
- [9] 董杰, 管勇, 赵锋, 等. 灵山岛典型崩塌地质灾害成因机理分析及危险性评价 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 60-68.  
DONG J, GUAN Y, ZHAO F, et al. Genetic mechanisms of the collapsing geohazard on the Lingshan Island and their risk assessment[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(9): 60-68.
- [10] 徐美君, 刘洪华, 杨宝凯, 等. 青岛市地质资源环境承载力评价关键技术与应用 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 79-88.  
XU M J, LIU H H, YANG B K, et al. Key technology and its application to evaluation of carrying capacity of geo-resources and geo-environment in Qingdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(9): 79-88.
- [11] 吴晓雷. 青岛地下公共服务空间布局规划研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.  
WU X L. Qingdao underground space layout planning study of public service[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.
- [12] 杨晓刚, 王睿, 黄伟亮. 基于国内典型城市对比的地下空间开发利用现状及问题分析 [J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 69-75.  
YANG X G, WANG R, HUANG W L. Status and challenges of underground space development and utilization in China based on comparative analysis of typical Chinese cities[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 69-75.
- [13] 彭建兵, 黄伟亮, 王飞永, 等. 中国城市地下空间地质结构分类与地质调查方法 [J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 9-21.  
PENG J B, HUANG W L, WANG F Y, et al. Geological structural classification of and geological survey method for urban underground space in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019,

- 26(3): 9-21.
- [14] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 新生代以来中国大陆岩石圈尺度的大地构造分区 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1997, 22(3): 227-232.
- DENG J F, MO X X, ZHAO H L, et al. Geotectonic units of China continent on a lithospheric scale since Cenozoic[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(3): 227-232.
- [15] 冯锐. 中国地壳厚度及上地幔密度分布 (三维重力反演结果)[J]. 地震学报, 1985, 7(2): 143-157.
- FENG R. Crustal thickness and densities in the upper mantle beneath China (the results of three dimensional gravity inversion)[J]. Acta Seismologica Sinica, 1985, 7(2): 143-157.
- [16] ZHANG Y G, ZHENG W J, WANG Y J. Contemporary deformation of the North China Plain from global positioning system data [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(4): 1851-1859.
- [17] 马利柱, 窦衍光, 王磊, 等. 青岛市地铁隧道施工常见不良地质问题及对策分析 [J]. 工程建设与设计, 2021(14): 119-124, 141.
- MA L Z, DOU Y G, WANG L, et al. Analysis of common adverse geological problems and countermeasures in Qingdao metro tunnel construction[J]. Construction & Design for Engineering, 2021(14): 119-124, 141.
- [18] 林曼曼. 青岛近海海域灾害地质特征研究 [D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2014.
- LIN M M. The study on the characteristics of geo-hazard factors in Qingdao offshore[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics, 2014.
- [19] 山东省第四地质矿产勘查院. 山东省区域地质 [M]. 济南: 山东省地图出版社, 2003.
- The Fourth Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Shandong Province[M]. Jinan: Shandong Cartographic Press, 2003.
- [20] 王岸, 王国灿. 构造地貌及其分析方法述评 [J]. 地质科技情报, 2005, 24(4): 7-12, 20.
- WANG A, WANG G C. Reviews on morphotectonic and its analytical methods[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(4): 7-12, 20.
- [21] 程维明, 周成虎, 李炳元, 等. 中国地貌区划理论与分区体系研究 [J]. 地理学报, 2019, 74(5): 839-856.
- CHENG W M, ZHOU C H, LI B Y, et al. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 839-856.
- [22] 马学鹏. 青岛市地下水型浅层地热能开发适宜性评价 [D]. 青岛: 青岛大学, 2016.
- MA X P. The development suitability evaluation of shallow geothermal energy in Qingdao[D]. Qingdao: Qingdao University, 2016.
- [23] 青岛海洋地质研究所. 1: 25万青岛幅海洋区域地质调查报告 (J51C004001) [R]. 青岛: 青岛海洋地质研究所, 2014.
- Qingdao Institute of Marine Geology. 1: 250, 000 Marine regional geological survey report of Qingdao sheet (J51C004001) [R]. Qingdao: Qingdao Institute of Marine Geology, 2014.
- [24] 吴立进. 山东省地热资源特征及其分区研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2008.
- WU L J. Research on the characteristics of geothermal resource in Shandong Province and its division[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2008.
- [25] 李爱军, 张丰. 基于 DRASTIC 的山东省丘陵山区地下水防污性能评价 [J]. 山东国土资源, 2015, 31(5): 62-66.
- LI A J, ZHANG F. Groundwater vulnerability assessment in the hilly and mountain area of Shandong Province based on DRASTIC[J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(5): 62-66.
- [26] 李相然, 王欣. 胶东半岛海水入侵地区水资源高效利用与河口海岸生态修复技术 [M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- LI X R, WANG X. Efficient Utilization of Water Resources and Estuarine-coastal Ecological Restoration Technologies in Sea-water Intrusion Regions of Jiaodong Peninsula[M]. Beijing: Geology Press, 2014.
- [27] 王威. 鲁中南半湿润区岩溶水系统功能分区与可更新能力识别 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2019.
- WANG W. Functional regionalization and renewable capacity of karst water system in the semi-humid area, central southern Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [28] 续晓璟. 青岛市第四纪地层与新构造活动的研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2006.
- XU X J. The study on the Quaternary stratum and Neotectonic movement in Qingdao[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [29] 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources. Regional Geology of Shandong Province[M]. Beijing: Geology Press, 1991.
- [30] 山东省地震工程研究院. 山东省地震构造图 [M]. 济南: 山东省地图出版社, 2021.
- Shandong Institute of Earthquake Engineering. Seismic Tectonic Map of Shandong Province[M]. Jinan: Shandong Cartographic Press, 2021.
- [31] 黄永华, 尤惠川, 宋毅盛, 等. 山东胶东半岛地区断裂最新活动性研究 [J]. 震灾防御技术, 2007, 2(1): 39-49.
- HUANG Y H, YOU H C, SONG Y S. et al. Recent activities of faults in Jiaodong Peninsula, Shandong Province, China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007, 2(1): 39-49.
- [32] 李乃胜, 于洪军, 赵松龄. 胶州湾自然环境与地质演化 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- LI N S, YU H J, ZHAO S L. Natural Environment and Geological Evolution of Jiaozhou Bay [M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.
- [33] 田京祥, 李洪奎, 刘汉栋, 等. 山东省胶南市七宝山铅矿地质

- 特征及成因浅析 [C]// 加强地质工作促进社会经济和谐发展—2007 年华东六省一市地学科技论坛论文集. 合肥: 安徽省地质学会, 2007: 254-258.
- TIAN J X, LI H K, LIU H D, et al. Analysis of geological characteristics and forming mechanism of lead ore deposit in the Qibao Mountain in Jiaonan City, Shandong Province[C]// Proceedings of the 2007 Geoscience and Technology Forum of East China (Six Provinces and One Municipality): Strengthening Geological Work to Promote Harmonious Socio-Economic Development. Hefei: Geological Society of Anhui Province, 2007: 254-258.
- [34] 闫强刚, 王仁刚, 徐俊. 一岩质建筑边坡的稳定性分析 [J]. *城市勘测*, 2006(1): 71-75.
- YAN Q G, WANG R G, XU J. The stability analysis of a building rock-slope[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006(1): 71-75.
- [35] 朱祥山. 青岛地区“嵌岩”类基坑工程设计方法研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- ZHU X S. Research on "embedded-in-rock" foundation pits in Qingdao area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [36] 宋键. 青岛地区第四系地层划分与环境演变 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2007.
- SONG J. Quaternary stratigraphic division and environmental evolution in Qingdao area[D]. Yantai: Ludong University, 2007.
- [37] 张自光. 土岩二元地层地铁隧道合理埋深研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- ZHANG Z G. Study on the reasonable buried depth of metro tunnel in the two element strata of soil and rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [38] 任国林. 中国区域工程地质条件基本特征: 中国工程地质图 (1 : 4 000 000) 简介 [J]. *水文地质工程地质*, 1992, 19(3): 36-38, 52.
- REN G L. Basic characteristics of China regional engineering geological condition: brief introduction for China engineering geological map (1 : 4 000 000)[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1992, 19(3): 36-38, 52.
- [39] 李阔, 陈剑文, 徐飞飞, 等. 滨海城市地下空间开发综合潜力评价模型 [J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(5): 1412-1421.
- LI K, CHEN J W, XU F F, et al. Evaluation model of comprehensive potential of underground space development in coastal cities[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(5): 1412-1421.
- [40] 史玉金, 张先林, 陈大平. 上海深层地下空间开发地质环境条件及适宜性评价 [J]. *地质调查与研究*, 2016, 39(2): 130-135.
- SHI Y J, ZHANG X L, CHEN D P. Geo-environmental condition and feasibility assessment of the deep underground space in Shanghai City[J]. *Geological Survey and Research*, 2016, 39(2): 130-135.
- [41] 夏伟强, 董杰, 何鹏, 等. 青岛主城区地下空间开发利用地质因素的影响评价及适宜性分区 [J]. *地质学报*, 2019, 93(S1): 233-240.
- XIA W Q, DONG J, HE P, et al. Evaluation and suitability zoning of geological factors affecting the development and utilization of underground space in the main urban area of Qingdao[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(S1): 233-240.
- [42] 王青, 宋晓媚, 刘洪华, 等. 灵山岛地质遗迹特征与旅游开发 [J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(9): 36-48.
- WANG Q, SONG X M, LIU H H, et al. Research of geological relics on the Lingshan Island and its bearing on tourism development[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(9): 36-48.
- [43] 郭建新, 刘会平. 河南省确山县冯岗萤石矿床矿石加工及开采技术条件分析 [J]. *甘肃冶金*, 2020, 42(5): 1-5, 10.
- GUO J X, LIU H P. Analysis on technical conditions of ore processing and mining of Fenggang fluorite deposit in Queshan County, Henan Province[J]. *Gansu Metallurgy*, 2020, 42(5): 1-5, 10.
- [44] 李伟华. 青岛市地下空间资源评价方法及应用 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2020.
- LI W H. Qingdao underground space resource reevaluation method and its application[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [45] 朱妍, 王蜜蕾, 薛碧颖, 等. 青岛市海岸带地质环境问题与空间规划对策建议 [J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(8): 1-7.
- ZHU Y, WANG M L, XUE B Y, et al. Geological environment issues and spatial planning countermeasures in the coastal zone of Qingdao City[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(8): 1-7.
- [46] 裴子钰, 杨新安, 邱龔, 等. 砂-黏复合地层盾构地表沉降分析及沉降槽宽度系数修正 [J]. *铁道标准设计*, 2017, 61(9): 111-115.
- PEI Z Y, YANG X A, QIU Y, et al. Study on ground surface settlement induced by shield construction and modification of width parameter of settlement trough in sandy-clay mixed stratum[J]. *Railway Standard Design*, 2017, 61(9): 111-115.
- [47] 东南大学, 浙江大学, 湖南大学, 等. 土力学 (第三版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Southeast University, Zhejiang University, Hunan University, et al. *Soil Mechanics (third edition)*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [48] 李相然. 滨海城市环境工程地质 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999.
- LI X R. *Environmental Engineering Geology of Coastal Cities* [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1999.
- [49] 中国地质学会. 中国城市地质 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2005.
- Geological Society of China. *Urban Geology of China*[M]. Beijing: China Land Press, 2005.
- [50] 李相然, 邢纪波, 孙淑贤, 等. 烟台市区岩土体立体结构特征研究 [J]. *烟台大学学报 (自然科学与工程版)*, 2000, 13(1): 74-78.
- LI X R, XING J B, SUN S X, et al. Study on stereo-structure characteristics of rock-soil mass in the district of Yantai City[J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2000, 13(1): 74-78.
- [51] 窦衍光, 印萍, 陈斌, 等. 滨海基岩城市地质调查成果应用探

- 索与理论技术创新:以青岛市为例[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 1-9.
- DOU Y G, YIN P, CHEN B, et al. Application exploration, theoretical and technological innovation of geological survey results in coastal bedrock city: taking Qingdao as an example[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(9): 1-9.
- [52] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1992, 30(5): 377-392.
- [53] 邵万强, 陆晓燕, 张敬志. 青岛市市区第四系层序的划分[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(1): 5-8.
- SHAO W Q, LU X Y, ZHANG J Z. Division of Quaternary stratigraphic sequence in the urban area of Qingdao[J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(1): 5-8.
- [54] 闫韶兵. 工程地质评价空间模拟方法研究与应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- YAN S B. Research on spatial simulation method of engineering geologic evaluation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [55] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- LIAO S W. Expansive Soils and Railway Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.
- [56] 王海燕, 高锐, 卢占武, 等. 四川盆地深部地壳结构: 深地震反射剖面探测[J]. 地球物理学报, 2017, 60(8): 2913-2923.
- WANG H Y, GAO R, LU Z W, et al. Deep crustal structure in Sichuan basin: deep seismic reflection profiling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(8): 2913-2923.
- [57] 付云霞, 孙吉林, 徐锐, 等. 即墨温泉地热水水文地球化学特征及成因机制[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 25-35.
- FU Y X, SUN J L, XU R, et al. Studies on hydrochemical characteristics and forming mechanisms of Jimo hot spring geothermal field[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(9): 25-35.
- [58] 王蜜蕾, 窦衍光, 邹亮, 等. 青岛崂山周边地下水化学特征与矿泉水成因分析[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 17-24.
- WANG M L, DOU Y G, ZOU L, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and genesis of mineral water at Laoshan Mountain and surrounding areas, Qingdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(9): 17-24.
- [59] 花卫华, 廖艳云, 刘修国, 等. 基于子面模板库的第四纪三维地质模型快速构建[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, 38(5): 1128-1134.
- HUA W H, LIAO Y Y, LIU X G, et al. Rapid construction of Quaternary 3D geologic model on sub-surface template library[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(5): 1128-1134.
- [60] 马震, 黄庆彬, 林良俊, 等. 雄安新区多要素城市地质调查实践与应用[J]. 华北地质, 2022, 45(1): 58-68.
- MA Z, HUANG Q B, LIN L J, et al. Practice and application of multi-factor urban geological survey in Xiongan New Area[J]. North China Geology, 2022, 45(1): 58-68.
- [61] 韩博, 夏雨波, 马震, 等. 雄安新区工程地质层组划分、三维地质结构构建及其在城市规划建设中的应用[J]. 中国地质, 2023, 50(6): 1903-1918.
- HAN B, XIA Y B, MA Z, et al. Division of engineering geological strata, building of 3D geological structure and its application in urban planning and construction in Xiongan New Area[J]. Geology in China, 2023, 50(6): 1903-1918.
- [62] 翟月, 何松, 钱玉智. 青岛精细化城市地质模型构建设计与应用[J]. 城市勘测, 2021(6): 181-185.
- ZHAI Y, HE S, QIAN Y Z. Design and application of Qingdao fine urban geological model[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2021(6): 181-185.

## The characteristics of geostructures of urban underground space in coastal bedrock area of Qingdao

WANG Milei<sup>1,2</sup>, DONG Jie<sup>2,3\*</sup>, XU Gang<sup>1,2</sup>, SONG Weiyu<sup>1,2</sup>, XUE Biying<sup>1,2</sup>, ZOU Liang<sup>1,2</sup>, FU Jiani<sup>2,3</sup>,  
XING Shuxiao<sup>2,4</sup>, DOU Yanguang<sup>1,2</sup>

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China; 2 Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266101, China; 3 Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute, Qingdao 266101, China; 4 Henan College of Industry & Information Technology, Jiaozuo, 454000)

**Abstract:** It is urgent to develop the underground space efficiently and reasonably for the large-scale urban construction in Qingdao City, Shandong, China. The clear understanding of the geostructural characteristics of underground space in the city and providing a more scientific and reliable basis for rational planning and development of the urban underground space are important to meet the needs of urban sustainable development. Based on the data of urban geological survey and geoenvironment investigation, this paper summarizes the regional structure, geomorphology, fractures, rock and soil structure and geoenvironment conditions and introduces the geostructural characteristics of the underground space in detail for the city. Results show that the bedrocks strictly controlled the rock and soil structure and affects the distribution of quaternary sediments in Qingdao. The local rock masses can be divided into four types, and the Quaternary cap strata can be divided into 12 layers. The geo-structural model of Qingdao constructed by available data shows that the top buried depth of the middle-lower crust is about 12 km, and the key upper layer of the underground space development ranges from 0 to 60 m. The 3D geoenvironment model of the key layer of the surface shows clearly the geoenvironment structures, which is conducive to improving the overall understanding of the geological background of Qingdao and providing a scientific basis for the subsequent underground space development and construction.

**Key words:** Qingdao; geostructural characteristics; geo-structural model; underground space