

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.02.002

关中盆地城市群发展中几个关键基础地质问题

董英^{1,2}, 宋友桂³, 张茂省^{2*}, 兰敏文⁴, 付晓芬³, 刘慧芳³, 宁强强⁵

(1. 西北大学地质系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家实验室, 陕西 西安 710061; 4. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 5. 核工业二零三研究所, 陕西 咸阳 712021)

摘 要: 关中盆地属于断陷盆地, 地质构造复杂, 活动断裂发育, 地震活动频繁, 城市建设中面临一系列重大基础地质问题。在搜集分析关中盆地 1 000 多个各类钻孔数据的基础上, 对关中盆地城市群 1:5 万综合地质调查中实施的主要钻井和剖面进行研究, 探讨了城市群发展中面临盆地形成演化与活动断裂规避、第四系下限与关中盆地三维地质结构重建、水系演化与城市发展、历史时期古洪水事件与海绵城市建设等基础地质问题。研究表明: ① 关中裂陷形成于中晚白垩纪, 始新世开始成湖, 经过多次断陷与隆起, 形成 2 个沉积中心, 到上新世时湖泊扩展达到最大范围, 盆地第四纪以来仍处于持续、缓慢的下降接受沉积过程, 受秦岭持续构造隆升的影响, 沉积中心由南向北迁移, 这将对城市群布局产生重要影响。关中盆地城市群建设要回避断裂交汇处、端点和断层运动的枢纽部位。② 建议将绿三门组划为上新统, 不宜划分到第四系, 三门组的形成时代是穿时的, 在关中盆地第四系与地下空间规划的时候需要进行关注和纠正。③ 城市规划建设要遵循河湖演化的自然规律和区域地质地貌特征, 千年、百年一遇的洪水水位分别高于河漫滩 7 m 和 2.2 m, 最大年降水量超过 900 mm, 但季节分布不均, 可作为城市防洪水和海绵城市建设的设计依据。

关键词: 关中盆地; 地质环境; 第四系下限; 渭河水系; 洪水

中图分类号: X141

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)02-0012-15

Several Key Basic Geological Problems on the Development of the Guanzhong Urban Agglomeration

DONG Ying^{1,2}, SONG Yougui³, ZHANG Maosheng^{2*}, LAN Minwen⁴, FU Xiaofen³,
LIU Huifang³, NING Qiangqiang⁵

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 4. School of Earth Science and

收稿日期: 2018-08-20; **修回日期:** 2019-03-10

基金项目: 重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41530640), 中国地质调查局项目(DD20189270、DD20160261、DD20190294)联合资助

作者简介: 董英(1981-), 男, 四川资阳人, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: dongy329@163.com

*** 通讯作者:** 张茂省(1962-), 男, 陕西咸阳人, 研究员, 博导, 主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: xazms@126.com

Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. No. 203

Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712021, Shaanxi, China)

Abstract: The Guanzhong Basin is a fault basin, has complex geological structure, developed active faults and frequent seismicity, which cause a series of important basic geological problems in urban construction. On the basis of collecting and analyzing more than 1000 kinds of drilling data in the Guanzhong Basin, we have studied the main drilling wells and profiles in the 1: 50, 000 comprehensive geological survey of the Guanzhong Basin Urban Agglomeration, and then discuss some basic geological problems in this paper, such as the basin formation and evolution, the avoiding of active faults, the three-dimensional geological structure reconstruction of the Guanzhong Basin, the evolution of drainage system, the development of cities, ancient flood events in historical period and the construction of sponge city. The results show that: (1) The Guanzhong depression was formed in the middle and late Cretaceous, and the lakes began to form in Eocene. After many faults and uplifts, two sedimentary centers were formed. By Pliocene, these lakes expanded to the maximum extent. Since Quaternary, the basin has been in a continuous and slow process to decline and accept sediments. Affected by the continuous tectonic uplift of Qinling Mountains, these sedimentary centers migrated from south to north, which will affect the layout of urban agglomerations greatly. Thus, the construction of urban agglomeration in the Guanzhong Basin must be far away from the junction of faults, the end point and the pivot of fault movement. (2) It is suggested that the Lvsanmen Formation should be classified into Pliocene instead of Quaternary. The formation age of the Sanmen Formation has the characteristics of diachronis, which needs to be attention and correction when planning Quaternary and underground space in the Guanzhong Basin. (3) Urban planning and construction should follow the natural law of river and lake evolution and regional geological landform characteristics. The once-in-a-millennium precipitation is 900 mm, which can be regarded as the design basis for urban flood control and sponge city construction.

Keywords: Guanzhong Basin; geological environment; Quaternary lower limit; Weihe River system; flood

0 引言

关中盆地位于陕西省中部,西起宝鸡,东到潼关,南依秦岭,北接北山,东西长约 360 km,南北宽约 30~80 km,面积约 2.0 万 km²,地势西高东低,南北高中间低,中部较为平坦宽阔,由西向东呈箕状开口,渭河横贯其中。属暖温带半湿润-半干旱气候,自然、经济条件优越,盆地内土壤肥沃,农业发达,素有“八百里秦川”之称。

关中盆地地处亚欧大陆桥中心,处于承东启西、连接南北的战略要地,是中华文明的发源地之一,也是古丝绸之路起点和中国历史上农业最富庶地区之一。在新时代国家“一带一路”战略、“关中一天水经

济区发展规划”和“关中平原城市群发展规划”中,关中盆地城市群发挥着引领带动丝绸之路经济带建设的作用,促进国家区域协调发展的重要使命。在促进城市群实现一体化发展的同时,更要注重战略资源、地质条件、生态环境等一系列基础地质方面的研究。目前,关中盆地城市群正处在城镇化迅猛发展的关键阶段,一方面地质工作已成为城市群规划建设和经济发展的重要基础支撑;另一方面随着关中城市群城市化水平的不断提高,城市人口的增加,城市规模的急剧扩大,城市地质环境问题日益突出(张茂省等,2018),严重制约了城市群的可持续发展。

为有效支撑服务关中盆地城市群发展,中国地质调查局从 2004 年起相继部署实施了“关中盆地地

热调查”、“关中盆地地面沉降地裂缝调查”、“关中盆地多目标地球化学调查”、“关中盆地城市群城市地质调查”、“关中—天水经济区综合地质调查”、“关中平原城市群综合地质调查”以及“大西安多要素城市地质调查示范”等项目,解决了一系列城市地质问题,取得了重要进展和成果,在城市发展规划和工程建设中发挥了重要的基础作用。然而,目前城市群建设和发展中对关中盆地形成过程和活动断裂与地震对城市群安全的影响、第四系的时空分布特征与城市地下空间开发、渭河水系变迁对海绵城市建设的影响等基础地质问题的认识仍不清楚,这些问题将制约城市群的可持续发展和生态文明建设。在过去几十年的各种水文、工程地质、地震、地球物理、资源勘探等专题地质调查和大量的钻探资料为关中城

市群建设发展提供海量的地质数据资源,充分对这些地质资料进行开发利用,积极从新思路、新方式上为优化城市群建设提供服务。

笔者主要围绕关中盆地城市群规划建设和发展对地质工作的重大需求,收集了关中盆地 1 000 多个水文地质、工程地质和油气资源勘探等各类钻井(图 1)数据和文献资料,结合新近获得的钻井和剖面资料,探讨关中城市群发展中面临盆地形成演化与活动断裂规避、第四系下限与关中盆地三维地质结构重建、水系演化与人类文明变迁、历史时期古洪水事件与海绵城市建设等基础地质问题,为关中城市群建设和规划、区域经济可持续发展和保护地下水资源以及城市群地质环境管理和资源配置提供决策参考。

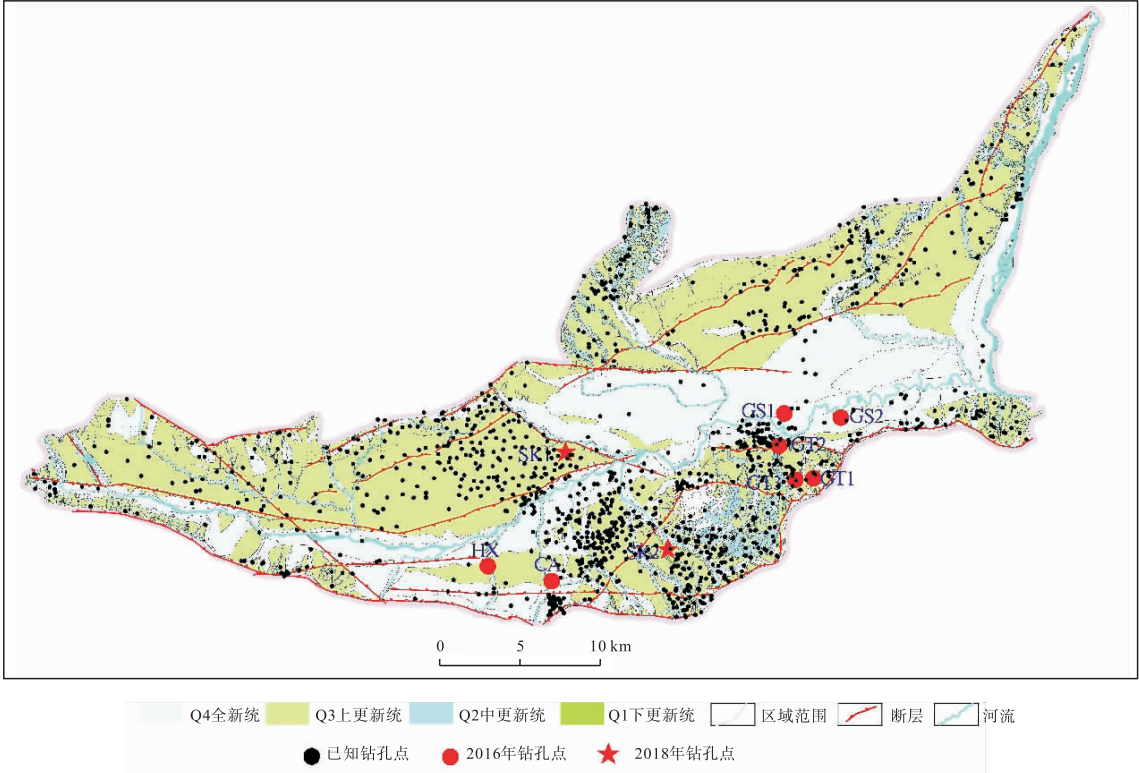


图 1 关中盆地已有钻孔和新获得的钻孔分布图
Fig. 1 Distribution of drilling sites in the Guanzhong Basin

1 关中盆地形成演化与活动断裂规避

1.1 关中盆地的形成与演化

关中盆地处于中国大陆东西向与南北向两大构

造带交汇区,上叠于秦岭造山带与鄂尔多斯地块交接带之上。关中盆地始于中生代晚期陆内造山作用后垮塌伸展断陷,新生代新近纪以来演化为断-拗陷性盆地。关中盆地起始是在中生代秦岭陆内造山带北缘巨型逆冲推覆构造的隆起带基础上,遭受长期

剥蚀夷平后,中晚白垩纪开始垮塌形成的断陷盆地。自始新世起,由于区域应力场的变化,在鄂尔多斯地块与秦岭的结合部位,沉陷形成了狭窄的关中之灵宝半地堑并积水成湖。湖泊水体面积不大,位于盆地中部,呈东西走向(图 2)。根据钻孔和地球物理资料分析,盆地范围大体在宝鸡-咸阳断裂及鲁桥断裂以南,余下断裂及华山山前断裂以北,周至以东,向

东可与灵宝盆地相连,盆地沉积一套陆相紫红色泥岩、砂质泥岩及细砂岩互层的河湖相沉积红河组。到渐新世受构造影响,西安凹陷与固市凹陷和咸渭凸起形成,早期的沉积中心分裂为 2 个沉降中心,沉积以灰白色块状砂岩为主的河湖相白鹿塬组,在南北山麓地区为一套灰白色厚层砂岩夹紫红色泥岩的冲积扇沉积(图 3)。

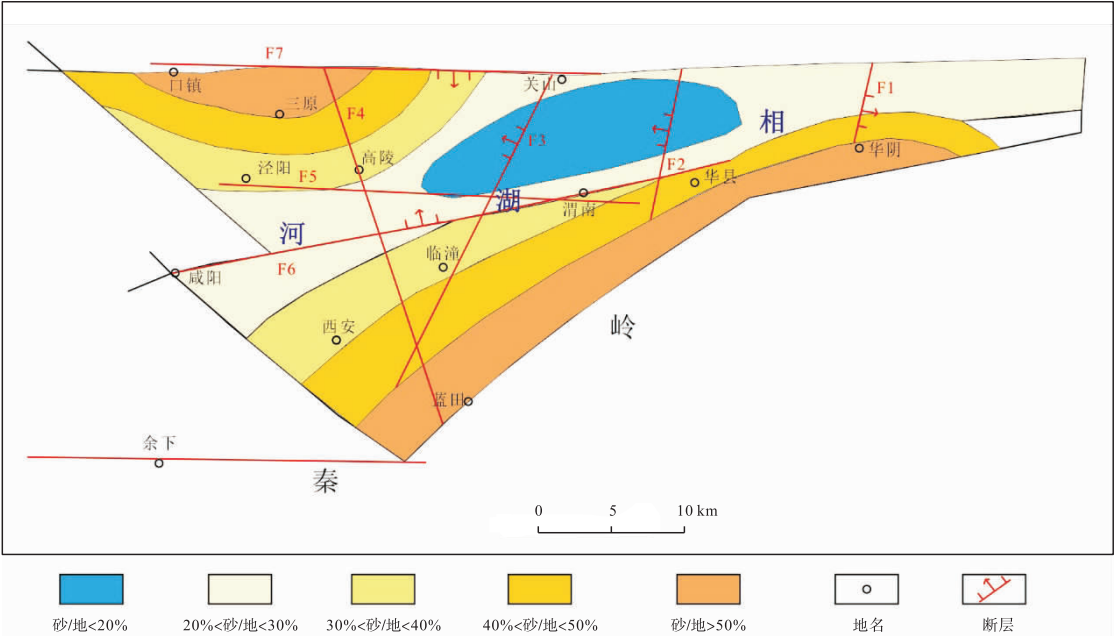


图 2 关中盆地始新世红河组沉积相图

Fig. 2 Sedimentary facies of the Eocene Honghe Formation in the Guanzhong Basin

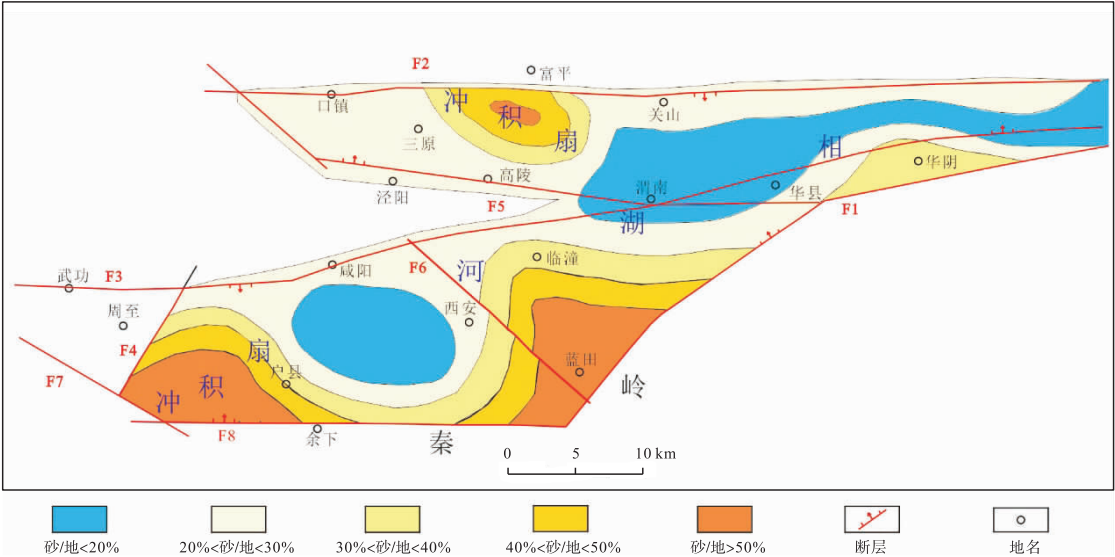


图 3 关中盆地渐新世白鹿塬组沉积相图

Fig. 3 Sedimentary facies of Oligocene Bailuyuan Formation in the Guanzhong Basin

渐新世晚期至中新世早期,关中盆地由断陷沉降转为隆起,未接受沉积,造成古近系、新近系普遍存在不整合接触关系。从中新世早期末开始,随着边界断裂的滑落,断陷带下陷的范围、幅度向外迅速扩大,整个盆地底部沉积一套较粗粒的物质,北边的扶风、乾县、三原、富平一带也开始沉降并接受冷水沟组沉积(图 4),盆地进入稳定沉降过程,湖泊范围逐渐扩展,而东部则变化较大,沉积了棕黄色泥岩、砂质泥岩与砂岩互层的寇家村组。在中新世的中、晚期,受青藏高原和秦岭构造隆升的影响,关中盆地发生大幅度的断陷,沉积了主要由浅棕红色砂岩、褐色泥岩夹灰白色细砂岩及粗砂岩组成的灞河组,湖泊范围所减少,但河流相、冲积扇相和三角洲相范围扩大(图 4)。上新世时期是关中断陷带发展演化的一个重要阶段,断陷带的裂陷作用加剧,盆地的范围向四周大幅度扩张,向西至宝鸡地区均有沉积,沉积以泥岩、砂质泥岩与砂岩互层为主的河湖相张家坡组,是关中盆地生物所的重要源岩。传统意义上的三门古湖形成,东部为一套厚度大、岩性变化快的砂砾岩与泥岩互层沉积,由东向西,冲积扇快速相变为湖相沉积,盆地南部三角洲、河流相发育(图 5)。

第四纪以来关中盆地基本继承了上新世的构造沉积格局,盆地仍处于持续、缓慢的下降接受沉积过

程,受秦岭处持续的隆升的影响,沉积中心由南向北迁移,沉积范围向北扩大。早更新世早期由于盆地持续的断陷作用,新近纪上新统张家坡期的湖泊不仅延续下来,三门古湖进一步扩大,古三门湖范围达到鼎盛时期,整个盆地以河湖相沉积为主,在湖泊边缘及隆升处有少量午城黄土分布(图 6a)。当进入早更新世晚期约 1.2 Ma 前后,黄河切穿三门峡,三门古湖泊外泄,湖泊面积大大萎缩,渭河现代水系格局形成,沿渭河及支流,如灞河、泾河开始形成河流阶地。中更新世时期沉积相主要以风成黄土沉积和河湖相为主,早更新世形成的湖盆进一步缩小,固市凹陷的沉降中心向东、向北迁移,在凸起处,除了发育河流相外,还堆积风成沉积(图 6b)。晚更新世关中盆地的地貌与水系格局与现在无明显区别,主要以冲洪积、河流相和风尘黄土沉积为主,沉积厚度变化趋势为西北向东南增厚,晚更新世乾县组分布于渭河谷地及其支流的二级阶地下部及西安和固市凹陷中,为河流冲积、洪积的粘质砂土、砂粘土、砂及砾石层,整合于泄湖组之上,0.15 Ma 前后河南三门峡湖相沉积彻底结束(图 6c)。全新世时期受人类活动影响较大,沉积相类型复杂多样,主要以冲积、洪积和风积为主(图 6d),地貌的变化主要是渭河的迁移为主要特征,在河流两岸形成一系列的低阶地和河漫滩。

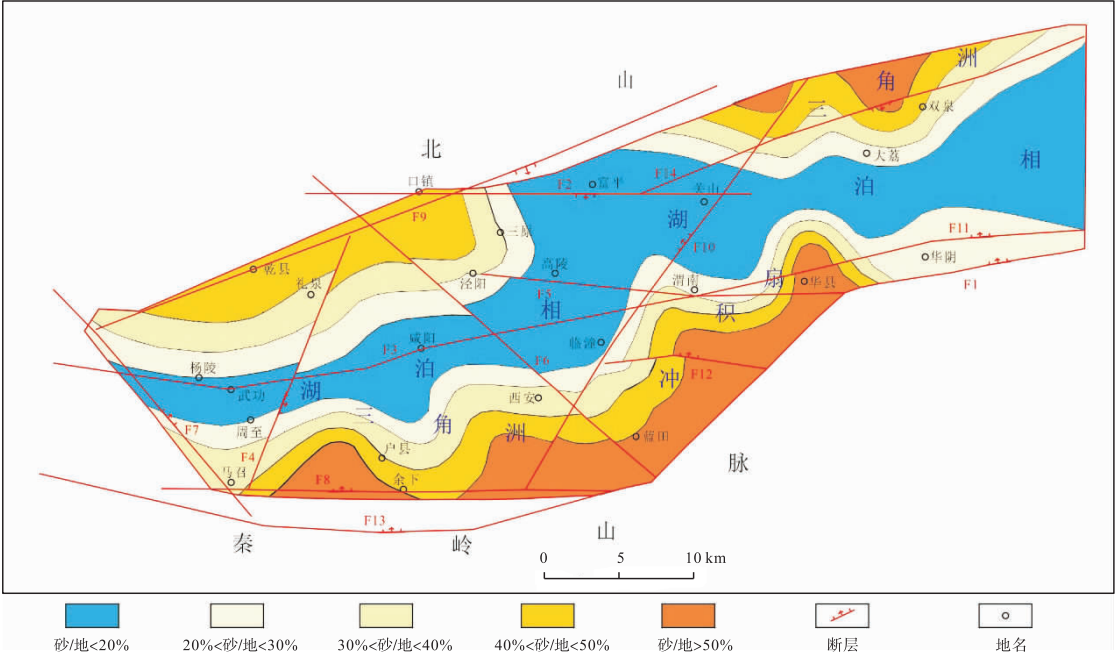


图 4 关中盆地新近纪冷水沟组沉积相图

Fig. 4 Sedimentary facies of Neogene Lengshuigou Formation in the Guanzhong Basin

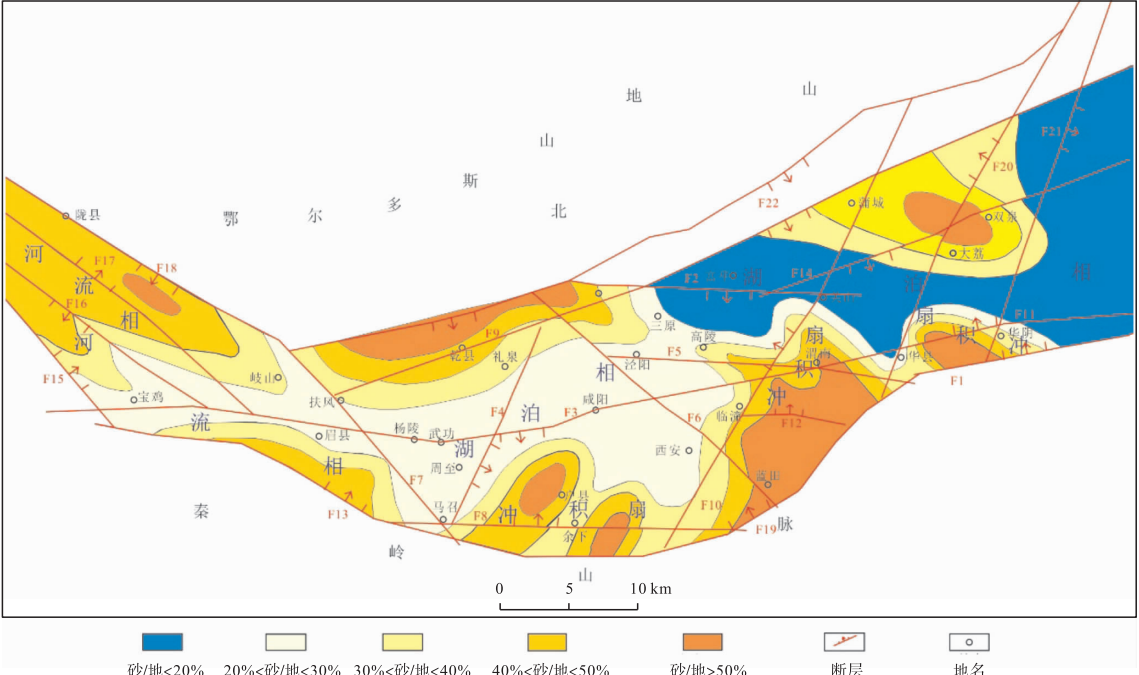
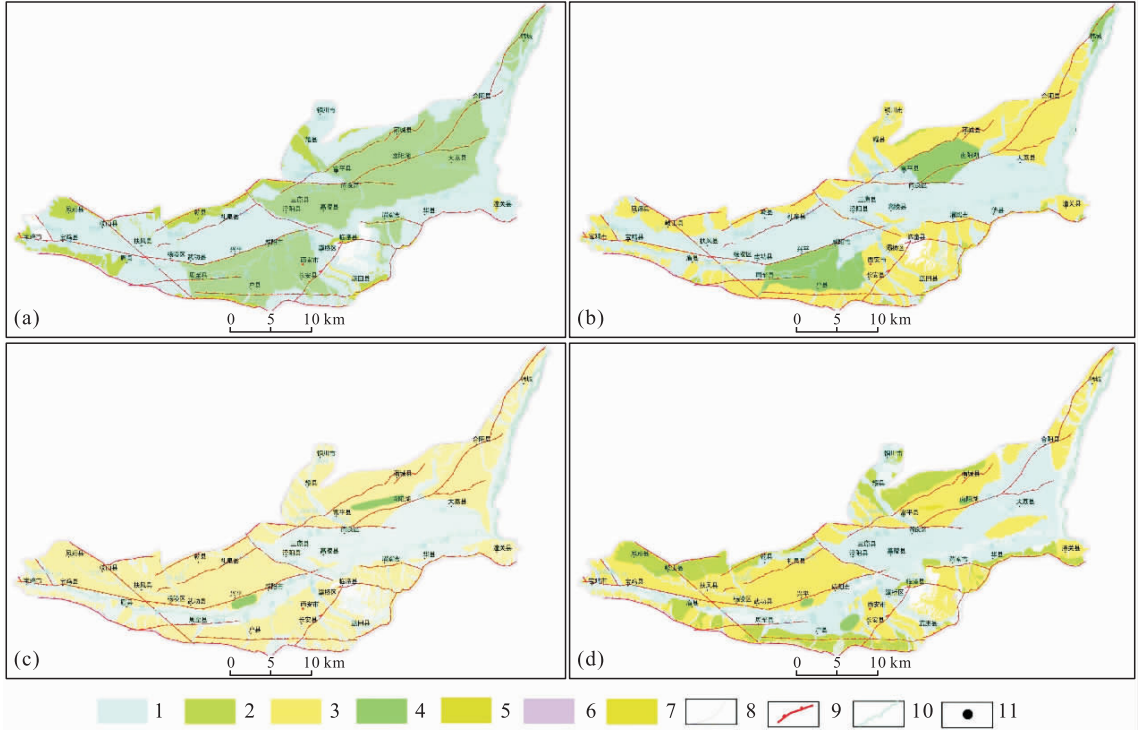


图 5 关中盆地中新世霸河组沉积相图

Fig. 5 Sedimentary facies of Neogene Bahe Formation in the Guanzhong Basin



1. 冲积层;2. 洪积层;3. 风积层;4. 冲积-湖积层;5. 冰水沉积层;6. 滑坡-重力堆积(未分层);
7. 沼泽-化学沉积(未分层);8. 区域范围;9. 断层;10. 河流;11. 城市

图 6 关中盆地第四纪沉积相图(a:上更新世;b:中更新世;c:晚更新世;d:全新世)

Fig. 6 Sedimentary facies of Quaternary in the Guanzhong Basin(a: Upper Pleistocene;
b: Middle Pleistocene ; c: Late Pleistocene ; d: Holocene)

1.2 关中盆地活动断裂的分布及活动特征

关中盆地西受贺兰-川滇南北构造带和青藏高原东北缘扩张构造叠加改造控制影响,而盆地东受西太平洋陆缘俯冲作用,盆地新生代断裂十分活跃,主要的活动断裂包括东西向断裂、北东-北北东向断裂、北东东向断裂和北西向断裂(图 7)。其中,东西向断裂主要包括口镇-关山断裂、渭河断裂以及骊山北侧断裂等,这些断裂在新生代以来活动较为强烈,历史上曾发生

过多次地震,且强度较大。北东-北北东向断裂主要发育在盆地东部,在空间分布上自东而西由密变稀,在新生代以来较为活跃,引起一系列中小型地震。北东东向断裂分布于盆地北缘的岐山-乾县-富平-蒲城一带,由近平行展布的两支断裂组成。关中盆地北西向断裂发育,在该区的西、中、东部均有分布,新构造运动时期,该类断裂表现出较强的活动性,现今活动也很强烈,这类断裂决定了盆地西部的地震活动。

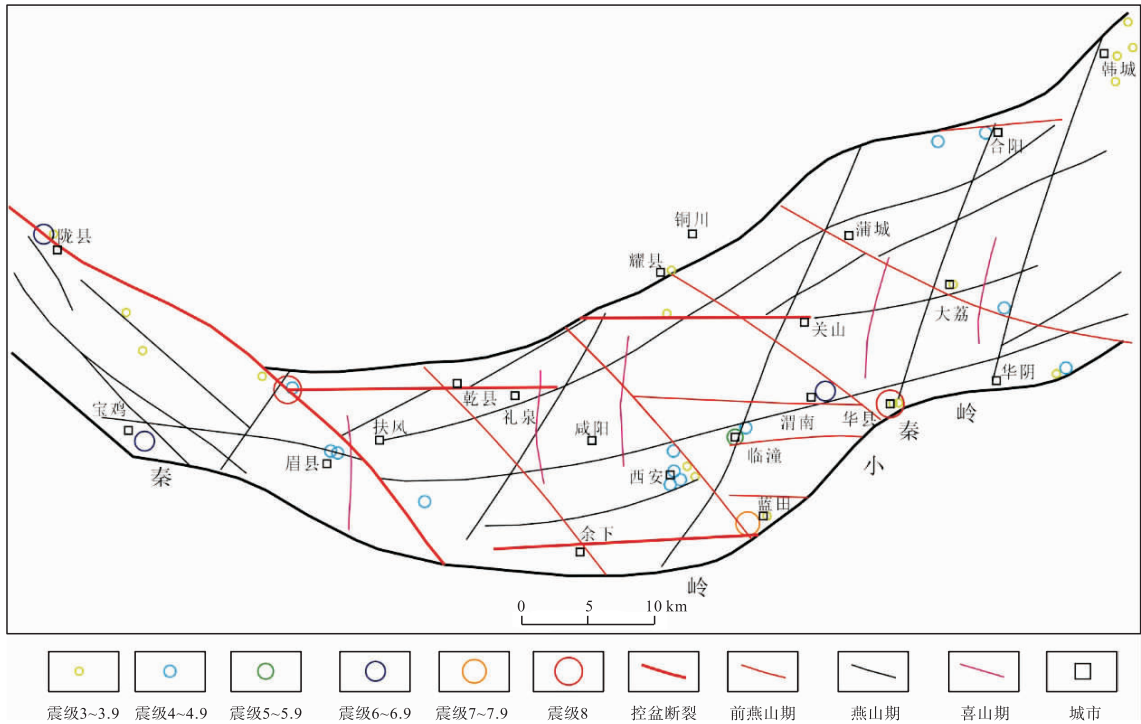


图 7 关中盆地断裂与地震震中分布图

Fig. 7 Distribution of faults and earthquake epicenter in the Guanzhong Basin

1.3 区域地壳稳定性评价

关中盆地是中国地震记载最早最为详细的地区,根据国家地震科学数据共享中心 (<http://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html>) 提供的数
据,从公元前 1177 年岐周地震至今 3 000 年来,共记载震情 243 次,关中盆地内部地震活动性强,其中五级以上地震 26 次,陕西省 9 次 6 级以上地震有 8 次就发生在这里。不论大小地震都沿最为活跃的断裂云集成带,且盆地内部地震震中分布不均匀(图 7),可将其分为关中盆地西部的陇县-周至北西向地震条带、关中盆地中部的耀县-临潼地震密集分布区和关中盆地东部的韩城-合阳地震密集分布区。根据关中盆地的地震强弱,可划分出地震弱活

动区 31 个,地震中等活动区 46 个,地震较强活动区 41 个,地震强烈活动区 4 个。其中华县-华阴地区位于地震强烈活动区,西安、陇县、韩城等地处于地震较强活动区。地震强烈活动区和地震较强活动区是今后中强地震发生的主要地段,尤其是断裂交汇处、端点和断层运动的枢纽部位更易发生大震。

关中盆地总体处于较不稳定-不稳定区范围。因此,从地质构造稳定性的角度来说,在进行城市建设规划时应避开地震密集分布区和地震强烈活动区。如西安-临潼一带、华县-华阴一带、陇县和韩城等地区,尤其要注意在地震强烈活动区和较强活动区应避免兴建高层-超高层建筑,对已有的高层-超高层建筑应采取措施提高其抗震强度,并且应该

根据建筑物的类型和性质,合理选择避让距离。城市规划建设的重心可以考虑放在咸阳一带、蒲城—大荔一带以及关中盆地西部等较稳定地区,这些地区区域地壳稳定性较佳,较少有破坏性较强的地震发生,有利于城市建设的延续性。

2 第四纪下限与关中盆地三维地质结构重建

2.1 关中盆地第四纪下限问题

第四纪沉积物是与人类活动和城市建设密切相关的地质体,其沉积厚度、空间分布三维结构特征对指导城镇建设、资源开发、交通与水利工程建设具有重要意义。而第四纪下限的确定直接决定了关中盆地的第四系沉积物的厚度。关中盆地第四纪下限问题存在多种说法,主要针对于黄土沉积和三门组归属问题的讨论。在关中盆地南部白鹿塬和渭南东南的长寿塬发育了连续的河湖相/风成红粘土-黄土的晚新生代沉积。渭南郭塬北缘的阎村 W7 孔岩心由三部分组成,即黄土段(0~120 m),黄三门段(128~255 m)和绿三门段(255~432 m),黄三门含脊椎动物化石大角鹿 *Euctenoceros* sp.、中国野牛 *Bison palaeosinensis*;古地磁研究表明“黄三门”的大致是 2.4~1.2 Ma,而绿三门为 3.0~2.4 Ma(孙建中,1986;童国榜等,1989;张宗祜等,1991;胡巍等,1993),黄三门和绿三门大致分别归属于更新统和上新统。有学者将三门组统一视为上更新世的沉积。本次区域地质调查中,在渭南长寿塬开展了钻探工作,200 m 深的 GT3 孔的磁性地层与沉积学表明,三门组河湖相沉积结束于 L15,即 1.2 Ma,而黄三门与绿三门位于 M/G 界线,这与渭南武家堡(孙建中,1988)、宝鸡长寿沟(方甲炳等,1992)和蒲城卤阳湖(颜永豪,2016)结果一致(图 8),支持将第四纪下限置于 2.6 Ma。在白鹿塬狄寨南甘枝村的 SK2 钻孔揭示黄土与红粘土的界线在 M/G 界线附近(图 8)。这与前人通过野外露蓝田段家坡剖面的磁性地层研究结果(岳乐平,1989)一致,也与黄土高原其他黄土-红粘土剖面结果一致(SUN et al., 1997),即黄土-古土壤序列属于第四纪风尘沉积物,而红粘土为晚新近纪的沉积。红粘土颜色整体呈棕红或紫红色,沉积代表着当时形成的气候条件以湿

热为主,地层内普遍含有钙质结核和铁锰质,表明当时氧化环境较为明显,孢粉组合资料证实当时属温带森林草原气候。进入第四纪,气候在全球变冷的趋势下出现明显的冷干-暖湿的冰期-间冰期周期性变化,它们是明显不同的气候与沉积环境下的产物。

虽然对关中盆地第四纪下限尚有不同的看法,但笔者的新钻孔磁性地层与大多数人的观点一致,支持其下界的位置处于黄土与下伏红粘土的交界线,三门组应该为第四纪的沉积物,绿三门应该当改为上新世张家坡组或游河组,也就是说黄三门与绿三门的界线也就是第四纪的底界,其地质年代相当于 M/G 分界线。从岩性地层、磁性地层、生物地层以及气候环境转变等证据都支持将第四纪下限划在黄三门与绿三门的界线或黄土与红粘土的界线之处,即 M/G 年代 2.6Ma。因此,前人根据岩性地层对比,缺乏磁性地层证据的钻孔或剖面,第四纪时期沉积厚度没有原来认为的那么厚,这对地下空间利用和资源开发具有重要意义。

2.2 关中盆地第四纪三维地质结构

关中盆地内第四系发育较为完整,广布全盆地,与下伏古近—新近系为不整合接触。成因类型复杂,既有风积、冲洪积、湖积,也有冰水、坡积、滑塌堆积,岩性以黄土和砂砾卵石为主。盆地第四纪沉积厚度差别极大,总体由西北向东南增厚。盆地沉积中心处的西安—鄠邑区、渭南—固市等地第四纪沉积厚度最大,河谷区一般均大于 400 m,黄土塬区一般厚 100~300 m 或小于 100 m。第四纪沉积主要分布固市凹陷阎良—渭南和西安凹陷兴平—咸阳一带,但厚度没有超过 700 m。另外,在华县、大荔和眉县—岐山一带也有 400~500 m 的沉积。风积黄土主要分布渭河南北黄土塬区、秦岭、渭河北山山麓和台地上以及覆盖于河流阶地之上,白鹿塬的刘家坡和段家坡第四纪黄土-古土壤厚 130~140 m,在渭南阳郭塬阎峪剖面达 160 m。在咸阳地区,总厚度可达 200~240 m。根据第四纪沉积物的厚度,初步构建了关中盆地第四纪空间分布的三维地质图(图 9),总体而言,第四系的沉积中心还是在鄠邑区和渭南—固市一带,但比前人报道的薄。关中盆地三维地质结构的建立有利于笔者对盆地深层地质特征的了解,并且对重要经济区工程建设、城市安全的评价以及盆地资源开发利用都有着重要意义。

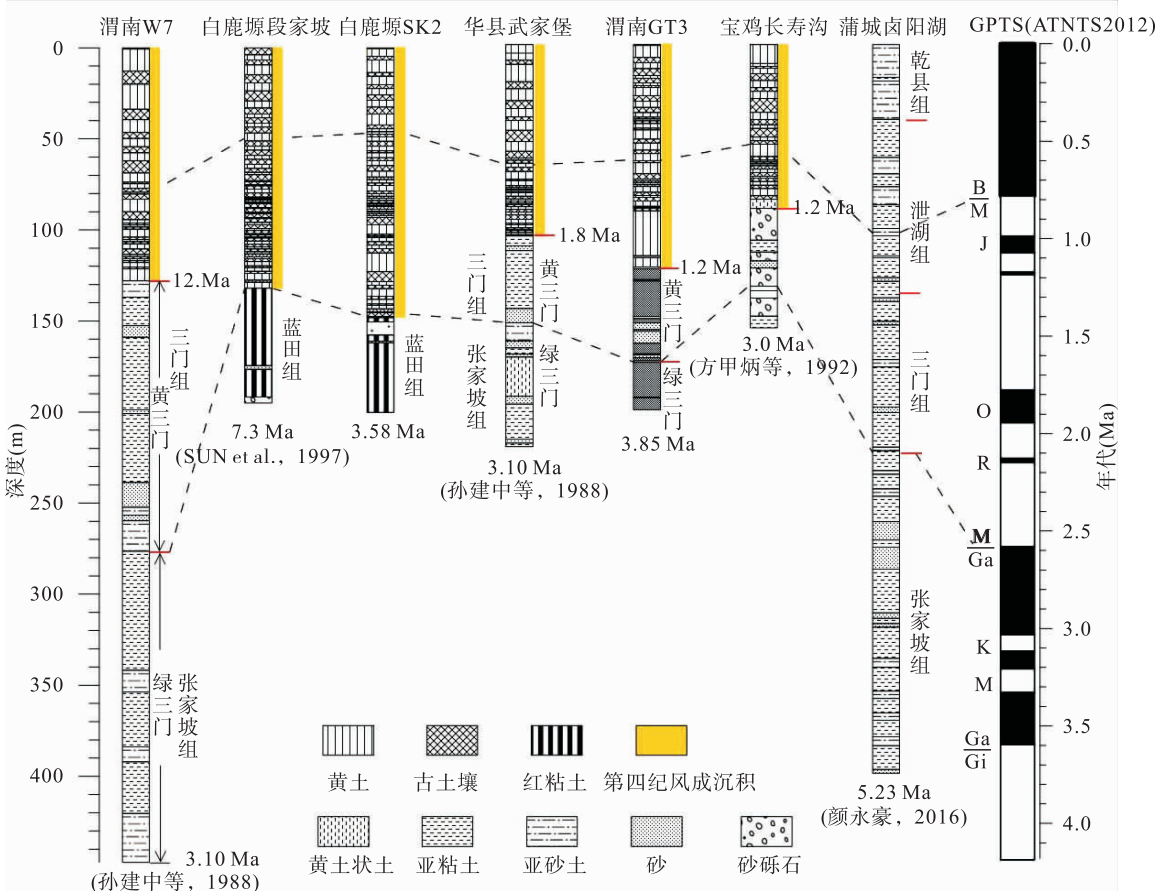


图 8 关中盆地钻孔与剖面岩性与磁性地层对比图

Fig. 8 Correlations of lithology and magnetostratigraphy of drilling cores and outcrops from the Guanzhong Basin

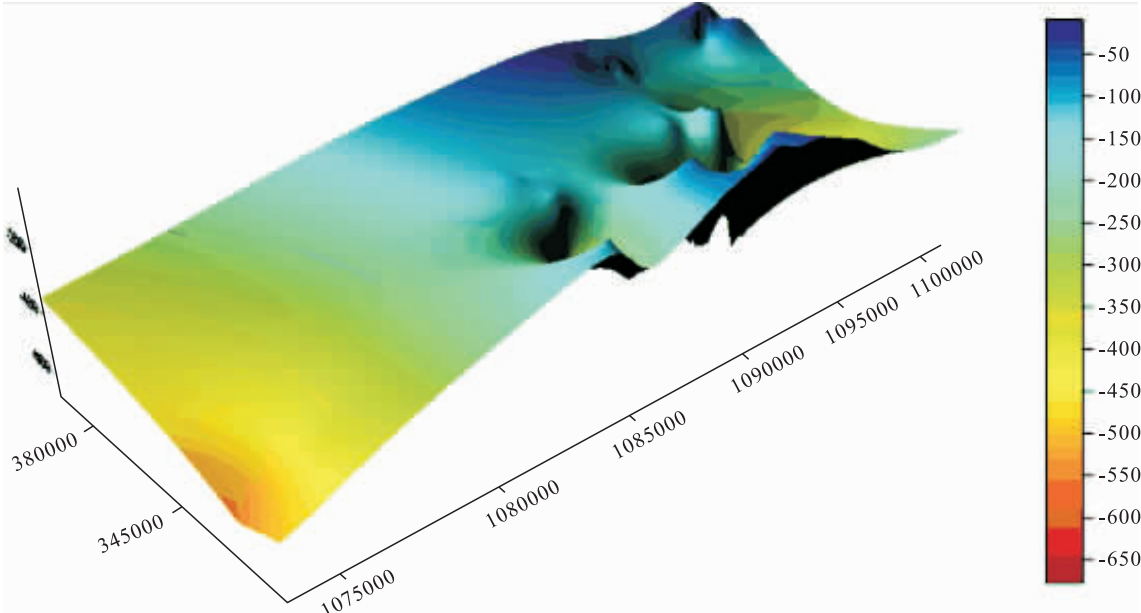


图 9 关中盆地第四纪地层空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution of Quaternary strata in the Guanzhong Basin

3 关中盆地水系演化与城市发展

3.1 关中盆地水系对古人类聚落的影响

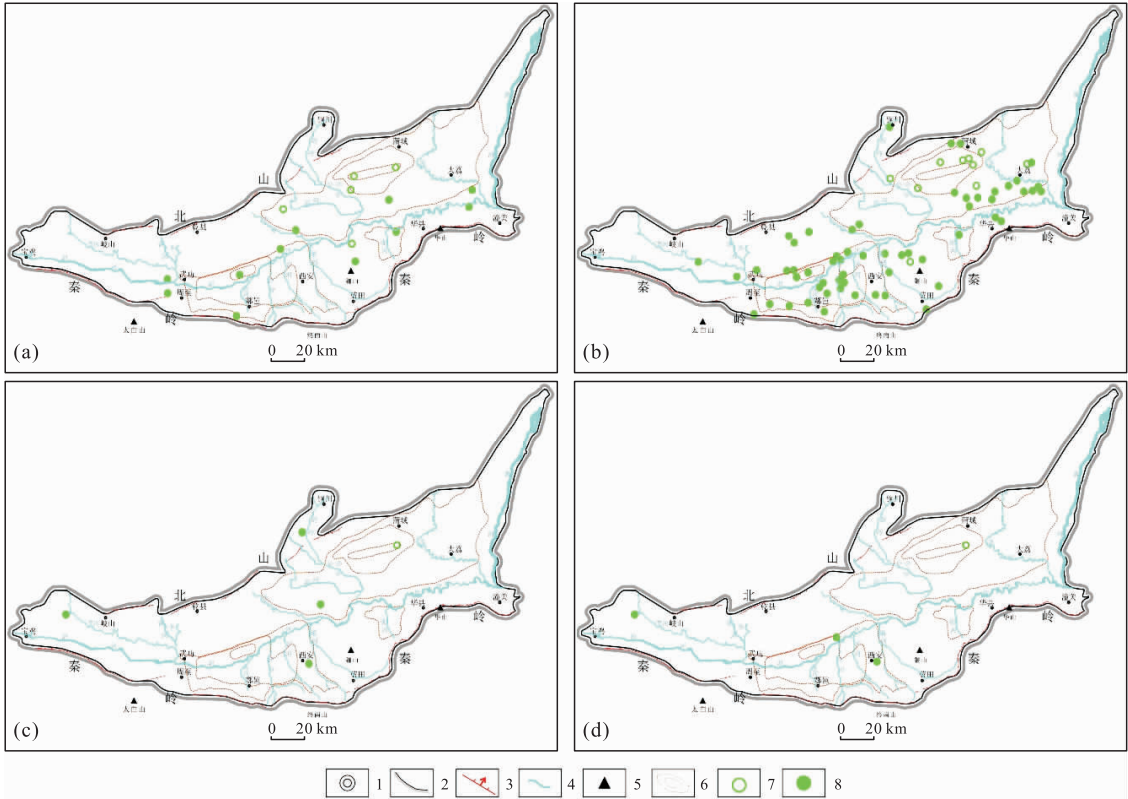
受区域构造和古气候变化的影响,关中盆地河流水系在不停变化中,对关中地区聚落的选址具有重要的影响。气候温暖湿润,河流发育,山前台塬地带广泛,该地区的人类遗存明显增多。早更新世晚期受秦岭构造隆升的影响渭河向北侧迁移,发育于秦岭的诸河下游段流向、河道形态发生了相应的变化。渭河在西安段的变化虽有向南摆动情况,但总的趋势是北蚀侧移,使得临河而生的“蓝田人”和后来的依洛河面而居的“大荔人”的生活空间在地貌微区位上不断变迁。旧石器时代考古发现,在 2.12 Ma 前,在灞河蓝田玉山镇附近有人类居住(ZHU et al., 2018)。随着湖泊的退缩和河流阶地的发育,平原地带的河流阶地上,史前聚落遗址的分布越来越密集,泾河东岸有著名的新石器时代的半坡文化

遗址,当时的居民以捕鱼作为食物的重要来源之一,说明当时居民临河而居。

3.2 渭河水系对关中盆地历史发展的影响

3.2.1 历史时期渭河水系变迁

地史时期的湖泊干涸和河流的变迁是构造与气候相互作用造成的,而历史时期,大都是自然与人类活动等因素相互叠加造成的,关中地区湖沼的演化就说明了这一问题(图 10)。根据有关文献资料(史念海,1998;赵天改,2001),先秦时期,虽湖沼数量不多,但水量丰富(图 10a),到隋唐时期,大兴水利,这湖沼数量达到鼎盛时期(图 10b),至唐朝末年(图 10c),随着人口增多,农业迅速发展,为扩大耕地面积,原有植被遭到破坏,使渭河水量季节性变化明显,水土流失严重。随着社会的发展,关中盆地内的湖沼数量逐渐递减,渭河成为生活用水的排污河,使得渭河河水由清变浊,含沙量增大,渭河及其周围地下水水质不断受到污染,水质严重恶化。13 世纪末至 16 世纪初,卤阳湖富平县境内的盐池泽退化为盐



1. 地名;2. 盆地边界;3. 断层;4. 河流;5. 山峰;6. 第四纪湖泊演化范围;7. 盐湖/矿湖;8. 淡水湖

图 10 关中盆地湖沼的历史变迁(a:秦汉魏晋南北朝时期;b:隋唐时期;c:唐末-明清时期;d:现代)

Fig. 10 Evolution of lakes and marshes in the Guanzhong Basin(a: The Qin Han Wei and Nan-Bei Dynasties; b: Sui and Tang Dynasties; c: Late Tang-Ming and Qing Dynasties; d: Modern Times)

碱地滩,16 世纪末到 18 世纪初,趋于干涸。蒲城县境内的西卤池和东卤池在清代退化成卤泊滩,到 20 世纪上半叶,基本干涸。至今,关中盆地历史留存下的湖泊仅剩位于宝鸡的东湖、咸阳北部的咸阳湖、西安的曲江池和蒲城的卤阳湖(图 10d)。研究表明最近 2000 年,来卤阳湖的干涸,气候变化不是主要原因,人口增加、尤其是耕地面积的增加,是卤阳湖退化和干涸的重要原因。

3.2.2 水系变迁对古代关中城市发展的影响

渭河水系贯穿于关中盆地的演化历史,见证了社会的发展,对城市的演进具有重要的影响。古代社会大多都城依河而建,有助于农耕的灌溉和航运的便利,各时代的渭河在秦与元代的渭河河道之间南北摆动(史念海,1996;刘瑞,2014)。春秋以来河道北移的平均速率为 1.74~2.71 m/

a。在早期关中地区都城随着渭河的摆动而迁移,后期生活用水从依赖渭河水源到改用支流水源(图 11);交通以渭河航运为主到依赖漕渠再到缺乏航运条件(殷淑燕等,2006)。城市从渭河北岸迁移到渭河南岸,从靠近渭河到远离渭河,前者与自然过程有关,后者与人类活动密切有关。关中盆地渭河的变迁主要以发生在咸阳以下的下游段,以及支流的在下游段均具游荡性河流的特征,渭河长期侵蚀北岸,使北岸形成陡崖,对北岸城镇、农田造成严重威胁。因此,在渭河北岸城市建设时需要留出足够的缓冲距离,同时要加强护坡的建设,以防侧蚀。灞河在蓝田县以下,主流靠近白鹿塬一侧,使白鹿塬东侧形成陡崖,并导致严重的滑坡,造成较大的损失,故应加强灞河左岸的工程治理。

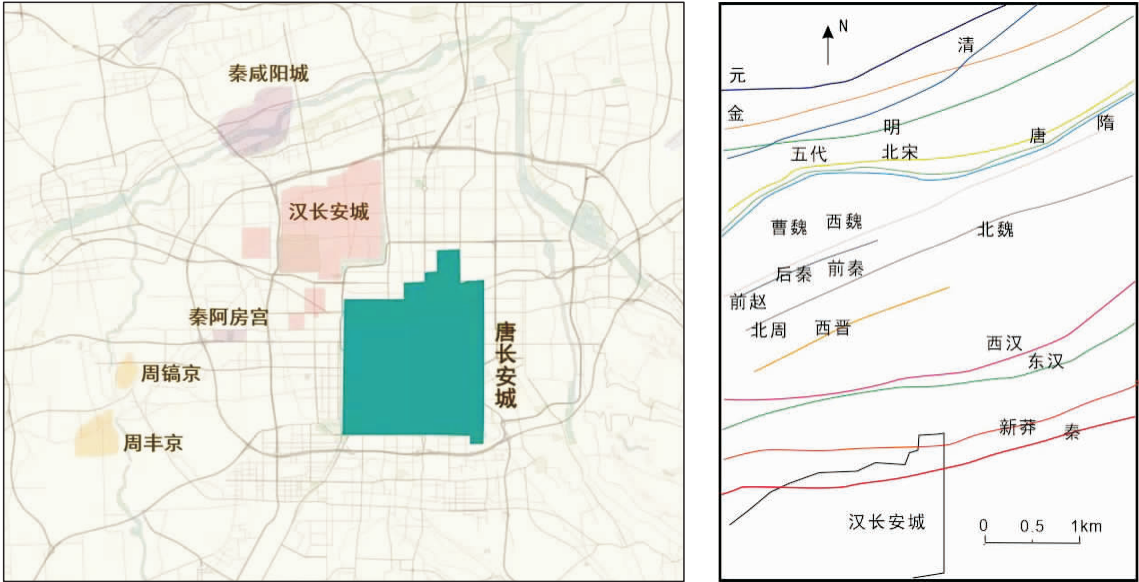


图 11 (a) 历史时期西安城址变迁与(b)渭河河床位置演化图

Fig. 11 (a) Evolution of Xi'an city locations and (b) riverbed position of Weihe river during historic period

3.3 渭河水系与关中盆地的生态修复

近年来,关中地区城市化的快速推进,促进地区经济社会发展的同时,对渭河流域水文循环的生态环境造成了一定的影响。例如,城市建设过程中过度挖取渭河及支流的砂子,使河道下切严重,严重影响河流两岸的公路铁路、工程设施和城镇安全;过度开发地下水、排污失控造成渭河及其周围地下水水质不断恶化,土地沙漠化、盐碱化日益增多,地质

灾害的频繁发生等。为解决以上环境问题,我们需从根本上对水资源进行管理。以渭河流域为主,在黄河流域特色的水生态系统保护与修复工程。例如,黄河河谷合阳马粪泉、合阳处女泉、徐水河国家湿地工程等工作基础上,积极探讨渭河流域以及关中城市群生态修复工程,开发现代城市湖泊水景工程和维护现代湖泊湿地,努力实现关中城市群建设与生态文明建设和谐共存。

4 历史时期古洪水事件与海绵城市建设

关中地区水涝灾害的发生在历史文献中有非常详细的记载,根据《陕西省自然灾害史料》、《中国西部农业气象灾害》等资料及当地县志资料,统计出关中地区公元前 350 年至 2000 年,计 2 350 年发生 323 次洪灾(图 12)(殷淑燕等,2006),平均 7 年发生 1 次。在隋朝以前,关中地区水涝灾害的发生频率少且稳定,而隋唐以后渭河水灾频率呈波动式上升,唐、元、清为洪灾频发期,到民国时达到顶峰。古洪水灾害文献的记录存在一定的局限性,可以通过古洪水天然剖面来研究古洪水。通过对渭河及支流河漫滩古水洪沉积剖面研究,表明最近 1 200 年发生了 90 次左右洪水事件。对西安北郊六村堡和相家巷洪水剖面粒度研究,表明在最近 1 200~660 年间(唐开元年间-明永乐年间)发生了 28 次大小不一的洪水,漫滩上的洪水沉积可达 3~5 m。对西安北郊草店村沉积剖面研究,表明距今 900~660 年(宋元期间)至少发生了 26 个洪水事件,洪水事件发生时河漫滩上的洪水深度均大于 2.2 m,最深可达 4~

7 m; 360~120 年间(清顺治-光绪年间)至少发生了 45 次大洪水或特大洪水,洪水深度可达 5~8m。渭河高陵和咸阳段近 120 年(清光绪年间以来)至少发生了 16 次大洪水,多次洪水深度>2.2 m。而周至仅发生了 14 次洪水(赵景波等,2017)。渭河渭南段沙王渡桥和上涨渡桥高漫滩渭河沉积指示,约近 120 年以来至少发生了 19 次较大规模的洪水,洪水发生时高漫滩上的洪水深度大于 2005 年渭南渭河高漫滩上 1.6 m 的洪水深度。与历史文献记录的渭河公元 1881 年来的 120 余年里发生过 18 次大洪水基本一致(赵景波等,2009)。对比研究表明,近 1 200 年当年水量增加到了 900 mm 有可能造成洪水超过渭河河漫滩 8 m 以上,而最近 120 年的洪水超过河漫滩 2.2 m。因此,海绵城市建设和城市防洪千年一遇的标准是至少高出河漫滩 8 m,而百年一遇的标准至少高于河漫滩 2.2 m。关中盆地现代 $\delta^{13}C$ 与降水量之间转换函数关系研究结果表明,关中盆地全新世大暖期期间距今 7 700~3 400 年降水量范围介于 619~906 mm(杨青,2014),与沉积剖面古洪水的研究结果(赵景波等,2009,2017)一致,最近 60 年的西安年平均降水量为 570 mm。因此,千年一遇的洪水年降水量的比现在要高 330 mm。

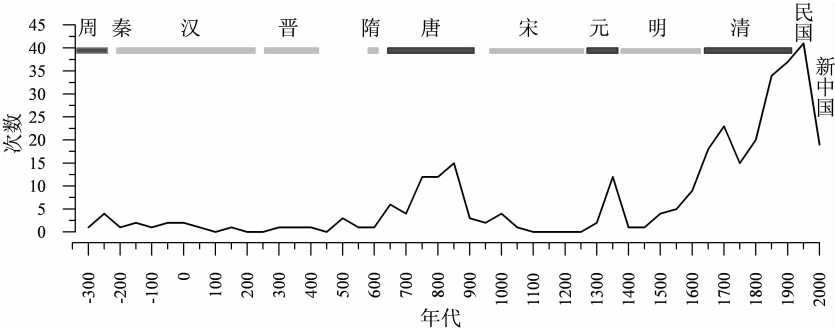


图 12 历史时期关中盆地水涝灾害频率统计图

Fig. 12 Statistical chart of flood disaster frequency in the Guanzhong Basin in historical period

深入分析发现,历史时期洪水灾害的发生一方面与关中平原气候变化、中心城市的发展建设与衰落有密切联系;另一方面也与人口数量的增长密切相关。在气候变化方面洪灾的发生主要是由当年夏季风活动加强带来的降水量的明显增加引起的,但明清小冰期期间降水量并不是很多,更多的与人类活动有关。气候变化是诱因,人类活动加剧灾害的程度。如唐长安城屡受水患,除了气候原因外,还与

在城市规划上的失误有关:排水系统的规划设计不够完备;未针对地形特点(城市中心为洼地,四周高,不易排洪)采取相应的防洪对策;城市水系缺乏足够的调蓄能力。水灾频发也是汉至隋唐以后城市选址由靠近渭河至远离渭河并向更南发展的原因之一。而隋后期至唐后期和明后期以来两段时间水旱灾害的根本原因在于城市建设和人口增加,人类活动加剧,对自然资源的开发利用和消耗大幅度增

长,对城市周边山地和丘陵地区环境的压力剧增,造成环境的迅速退化,导致平原地区洪涝灾害频繁发生。

近几十年来,关中地区特大洪水灾害频繁,1954年的洪灾,其主要原因是渭河上游和渭北降水增加所致。1957年自三门峡水库修建运行之后,渭河下游的水沙条件与河床演变发生了重大的变化,渭河流域淤积了大量泥沙,河床抬高,大片良田浸没,土地迅速盐碱化,危险直逼古都西安。由于泥沙不断淤积,致使同流量水位不断抬升,防洪断面不断减小,堤防工程需要不断地加高,容易促发洪涝灾害。2003年夏秋之交连续50 d的降雨,陕西渭河流域形成前后长达40 d的连续洪水,有5次洪峰,渭河秦岭北麓支流有3条河5处决口。这次渭河洪水具有总量大、水位高、洪水流速缓慢等特点,造成了巨大的经济损失(邢大韦等,2004)。除自然原因外,由于三门峡水库长时期高水位运行,渭河下游三门峡库区严重淤积,潼关高程居高不下,洪水顶托倒灌秦岭北麓渭河支流,以致有8条支流倒灌,3条支流决口,造成了严重的灾害。2003年洪水以后,国家投入巨资对渭河下游进行了灾后重建,加固和修复堤防工程,清淤疏浚,提高抗洪强度。2011年9月渭河下游发生了30 a来的最大洪水,但造成的洪灾较小(梁林江等,2012)。与2003年等洪水相比,2011年9月洪水未出现干支流堤防溃决险情,保护区未遭受洪涝灾害,实现了大水小灾,其根本原因在于渭河下游河道主槽明显扩大,过洪能力增大;潼关高程降低,渭河下游洪水下泄顺畅。

5 结论与讨论

笔者在分析整理关中盆地1 000多个各类钻孔数据的基础上,对关中盆地城市群1:5万综合地质调查中实施的主要钻井和剖面进行了基础地质问题研究,探讨了城市群发展中面临盆地形成演化与活动断裂规避、第四系下限与关中盆地三维地质结构重建、水系演化与城市发展、历史时期古洪水事件与海绵城市建设等基础地质问题,主要得出以下认识,为关中盆地群市群的建设与发展提供参考。

(1)关中盆地形成演化、活动断裂对城市群规划的影响。关中盆地形成演化与第四系空间分布的三

维地质图表明西安—鄠邑区和渭南—固市是关中盆地的沉积中心,其南缘如华县—华阴、西安—临潼为秦岭活动断裂带,存在着地震活动的危险,其中华县—华阴地区位于地震强烈活动区,西安、陇县、韩城等地处于地震较强活动区,在城市规划的时候需要注意,应避免兴建高层-超高层建筑。城市建设的重心可以考虑向区域地壳稳定性较好的咸阳一带、蒲城—大荔一带发展,这些地区历史上很少有破坏性较强的地震发生,回避断裂交汇处、端点和断层运动的枢纽部位,这样有利于城市建设的延续性。对关中地区区域地层和地壳稳定性的分析可为城市工程建设和地下空间的开发利用提供理论支撑。

(2)第四纪下限与第四系厚度的新认识。关中盆地的第四系下限在黄三门与绿三门的界线或黄土与红粘土的界线之处。原认为下更新统的绿三门应该为上新统沉积,不宜划分到第四系,建议将三门组的形成时代定为2.6~1.2 Ma。这样关中盆地的第四系厚度要整体变薄,在关中盆地第四系与地下空间规划的时候需要进行关注和纠正。

(3)渭河水系演化、历史洪水对城市防洪和海绵城市建设的启示意义。地质历史时期渭河水系尤其是河道变迁和古洪水研究表明,城市的建设规划要遵循河湖演化的自然规律和区域地质地貌特征进行,城市群建设和防洪标准至少要按高出现今河漫滩2.2 m,年降水量900 mm的标准设计。鉴于渭河受秦岭构造北推的影响,在渭河北岸城市建设时需要留出足够的缓冲距离,同时要尤其加强护坡的建设,以防侧蚀。历史时期强烈的人类活动尤其是城镇建设和大面开垦耕地、直接排污造成湖泊退化和干涸以及水体污染,对流域水系循环和水环境产生重要的影响,人类活动程度超过了大自然的自我调节和修复功能,导致旱涝灾害频发。关中城市群城镇化的推进,要进一步加快渭河综合治理,提高渭河下游堤防工程防洪能力;采取各种综合措施降低潼关高程,清淤疏浚,提高渭河下游河道过洪能力,进一步畅通流路;对渭河支流进行归并治理,在减轻洪涝灾害的同时变害为利。系统整治并修复湖泊、湿地、蓄滞洪区等生态功能重要区域,以减缓洪涝灾害的影响。

(4)在西部大开发和“一带一路”背景下,关中城市群建设海绵城市成了关中人民的迫切需求。海绵

城市建设虽然是针对城市水的问题,但绝不能“就水论水”,要实现有效的“径流控制”,不仅要形成雨水汇流的源头着手,而且要考虑“海绵体”载体(岩土)的物性,包括渗透和储存能力及储存雨水的危险性(诱发环境地质问题)和地下水位情况等。基于地质环境条件划定海绵城市适宜建设区、控制建设区和不宜建设区,首先考虑地形和地貌特征和地下水位情况,圈定适合可“滞”留和“净”化雨水的区域;其次考虑浅层地质环境因素,如第四系沉积物的“渗透”雨水能力,最后考虑深部地质环境因素。基于含水层地下水储存空间和地质灾害易发性圈定适合可“蓄”存雨水的区域和“滞”留、“蓄”存雨水危险性的区域(黄敬军等,2018)。借古鉴今,关中地区在当今城市群发展的过程中,在做好区域地质调查的基础上,需深化水资源管理办法,增强城市水系调蓄力,提升城市生态系统功能和减少城市洪涝灾害的发生,推动海绵城市的建设,从改善城市的生态环境开始,加大城市湖泊,湿地等水生态文明建设,建设智慧排水系统,有助于为当今关中城市群的防灾减灾提供参考。

参考文献(References):

方甲炳,杨飞,岳乐平. 宝鸡长寿沟渭河五级阶地磁性地层学研究[J]. 陕西地质,1992,10(1):53-59.

FANG Jiabing, YANG Fei, YUE Leping. Magnetostratigraphical Study of the Weihe Fifth-Order Terrace in Changshougou, Baoji City, Shaanxi Province [J]. Geology of Shaanxi, 1992, 10(1): 53-59.

黄敬军,武鑫,姜素,等. 海绵城市建设的地质影响及适宜性评价——以徐州为例[J]. 地质论评,2018,64(6):1472-1480.

HUANG Jingjun, WU Xin, JIANG Su, et al. Geological Influence and Suitability Evaluation of the Construction of Sponge City—a Case of Xuzhou [J]. Geological Review, 2018, 64(6): 1472-1480.

胡巍,岳乐平,田新红. 渭南沈河宋家北沟剖面磁性地层学研究[J]. 陕西地质,1993,11(2):26-32.

HU Wei, YUE Leping, TIAN Xinhong. Magnetostratigraphic Study on Songjiabeigou Section of Youhe River in Weinan [J]. Geology of Shaanxi, 1993, 11 (2):

26-32.

梁林江,袁峥,雷文青. 渭河下游“2011·9”洪水及河道治理措施分析[J]. 人民黄河,2012,34(12):15-17.

LIANG Linjiang, YUAN Zheng, LEI Wenqing. Analysis on the Flood in September 2011 and the River Regulation Measures of Weihe [J]. Yellow River, 2012, 34 (12): 15-17.

刘瑞. 西安附近秦汉以来渭河变迁研究概述[C]. 中国地理学会历史地理专业委员会. 历史地理学的继承与创新暨中国西部边疆安全与历代治理研究——2014年中国地理学会历史地理专业委员会学术研讨会论文集. 四川:四川大学出版社,2014:60-77.

LIU Rui. Summary of the Study on the Change of Weihe River since the Qin and Han Dynasties in Xi'an [C]. The Historical Geography Committee of the Geographical Society of China. Inheritance and Innovation of Historical Geography and the Study of Border Security and Historical Governance in Western China: Proceedings of the 2014 Chinese Geography Society Historical Geography Committee. Sichuan: Sichuan University Press, 2014: 60-77.

史念海. 汉唐长安城与生态环境[J]. 中国历史地理论丛, 1998, 14(01): 5-22+251.

SHI Nianhai. Changan City of the Han and Tang Dynasties: It's Relations to the Ecological Environment [J]. Journal of Chinese Historical Geography, 1998, 14 (01): 5-22 + 251.

史念海,史先智. 西安附近的原始聚落和城市的兴起[J]. 中国历史地理论丛,1996,12(4):1-25.

SHI Nianhai, SHI Xianzhi. The Original Settlements Near Xi'an and the Rise of the City [J]. Journal of Chinese Historical Geography, 1996, 12(4): 1-25.

孙建中. 关于“黄三门”与“绿三门”[J]. 长安大学学报(地球科学版), 1986, 8(4): 42-45.

SUN Jianzhong. On “Yellow Sanmen” and “Green Sanmen” [J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition), 1986, 8(4): 42-45.

孙建中,赵景波,魏明建,等. 武家堡剖面古地磁新资料[J]. 水文地质工程地质, 1988, 32(5): 44-48+36.

SUN Jianzhong, ZHAO Jingbo, WEI Mingjian, et al. New Paleomagnetic Data of Wujiabu Profile [J]. Hydrogeolo-

- gy & Engineering Geology, 1988, 32(5):44-48+36.
- 童国榜, 张俊牌, 刘明建, 等. 渭河盆地距今 200-300 万年古植被及第四纪下限的讨论[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(4): 86-96.
- TONG Guobang, ZHANG Junpai, LIU Mingjian, et al. Palaeovegetation (2-3Ma) and Lower Boundary of Quaternary in Weihe Basin, Shaanxi [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1989, 9(4): 86-96.
- 邢大韦, 张玉芳, 栗晓玲. 对 2003 年陕西渭河洪水的思考[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 14(1): 1-4+28.
- XING Dawei, ZHANG Yufang, LI Xiaoling. Thought about Flood of Weihe River in Shaanxi in 2003 [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2004, 14(1): 1-4+28.
- 杨青. 黄土高原第四纪植被演替及其气候环境变化[D]. 中国科学院大学, 2014.
- YANG Qing. Quaternary vegetation succession and climatic and environmental changes in the Loess Plateau[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- 岳乐平. 兰田段家坡黄土剖面磁性地层学研究[J]. 地质论评, 1989, 54(5): 479-488.
- YUE Leping. Magnetostratigraphical Study of the Loess Section at Duanjiapo, Lantian, Shaanxi [J]. Geological Review, 1989, 54(5): 479-488.
- 殷淑燕, 黄春长. 论关中盆地古代城市选址与渭河水文和河道变迁的关系[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2006, 35(1): 58-65.
- YIN Shuyan, HUANG Chunchang. On the Connection Between the Location of the Ancient Towns in the Guanzhong Plains and the Alterations of the Weihe's Hydrology and Waterway [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2006, 35(1): 58-65.
- 颜永毫. 黄土高原南部第四纪不同时间尺度侵蚀环境演变及驱动机制[D]. 中国科学院研究生院, 2016.
- YAN Yonghao. Evolution and Drives of Erosion Environment in South Loess Plateau in Quaternary Different Time Scales[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 张茂省, 王化齐, 王尧. 中国城市地质调查进展与展望[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 1-9.
- ZHANG Maosheng, WANG Huaqi, WANG Yao, et al. Progress and Prospect of Urban Geological Survey in China [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 1-9.
- 赵景波, 罗小庆, 黄小刚, 等. 西安周至渭河漫滩沉积特征与洪水变化[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 23-28.
- ZHAO Jingbo, LUO Xiaoqing, HUANG Xiaogang et al. Change of Flood and Sedimentary Characteristics of Floodplain in Zhouzhi Reach of the Weihe River [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(03): 23-28.
- 赵景波, 郁耀闯, 周旗. 渭河渭南段高漫滩沉积记录的洪水研究[J]. 地质论评, 2009, 55(2): 231-241.
- ZHAO Jingbo, YU Yaocuang, ZHOU Qi. A Study on Great Floods Recorded by Sediments on the High Alluvial Flat of Weihe River in Weinan, Shaanxi [J]. Geological Review, 2009, 55(2): 231-241.
- 赵天改. 关中地区湖沼的历史变迁[D]. 陕西师范大学, 2001.
- ZHAO Tiangai. Change of Lakes and Marshes in Guanzhong Region in the Historical Period[D]. Shaanxi Normal University, 2001.
- 张宗祜, 邵时雄, 刘海坤. 中国第四纪地层[M]. 北京: 中国海洋出版社, 1991, 77-121.
- ZHANG Zonghu, SHAO Shixiong, LIU Haikun. Quaternary stratigraphy in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1991, 77-121.
- SUN, D, LIU, D, CHEN, M, et al. Magnetostratigraphy and palaeoclimate of Red Clay sequences from Chinese Loess Plateau [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1997, 40(4): 337-343.
- ZHU Zhaoyun, DENNELL R, HUANG Weiwen, et al. Hominin occupation of the Chinese Loess Plateau since about 2.1 million years ago [J]. Nature, 2018, 559(7715): 608-612.