

王启耀, 石卫, 韩振兴, 等. 咸阳市区饱和软黄土特性及成因分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 306-310. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20201105007

WANG Qiyao, SHI Wei, HAN Zhenxing, et al. Characteristics and cause analysis of saturated soft loess in Xianyang City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 306-310. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20201105007

咸阳市区饱和软黄土特性及成因分析

王启耀¹, 石 卫², 韩振兴¹, 时 航¹

(1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061;

2. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 饱和软黄土是一种具有特殊性质的饱和黄土, 对工程建设极为不利。基于大量的勘察资料和试验数据, 文章总结了咸阳市区饱和软黄土的空间分布规律及物理力学性质, 并从黄土的湿陷性和地下水位的历史动态分析了饱和软黄土的成因。结果表明咸阳城区的饱和软黄土主要分布在二级阶地的中东部, 其平均孔隙比为 0.85、压缩模量为 5.07 MPa, 具有较大的孔隙比和压缩性, 强度也较低; 咸阳饱和软黄土形成的内部因素主要为黄土的特殊结构, 外部环境因素主要是 20 世纪 70 年代开始的大规模灌溉工程引起的水位上升。

关键词: 饱和软黄土; 分布特征; 物理力学特征; 地下水

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)02-0306-05

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20201105007

Characteristics and cause analysis of saturated soft loess in Xianyang City

WANG Qiyao¹, SHI Wei², HAN Zhenxing¹, SHI Hang¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: As a type of specific saturated loess, saturated soft loess is extremely unfavorable for engineering construction. Based on large amounts of survey data and testing results, this paper summarizes the spatial distribution characteristics and physical and mechanical properties of saturated soft loess in the Xianyang urban area. Furthermore, it analyzes the cause of saturated soft loess from the collapsibility of loess and the historical trend of groundwater level. Results indicate that the saturated soft loess in the Xianyang urban area is mainly distributed in the central and eastern parts of the second terrace, with an average porosity ratio of 0.85 and a compression modulus of 5.07 MPa, which has a large porosity ratio and compressibility and low strength. The main internal factor for the formation of saturated soft loess in Xianyang is the special structure of loess, and the main external environmental factor is the rise in water level caused by large-scale irrigation projects since the 1970s.

收稿日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077260, 41907235); 陕西省公益性地质调查专项(20180303); 陕西省重点研发计划项目(2021SF2-02)

第一作者简介: 王启耀(1975—), 男, 教授, 主要从事地质灾害与岩土工程方面的研究。E-mail: qiyawang@chd.edu.cn。

Keywords: saturated soft loess; distribution characteristics; physical and mechanical properties; groundwater

0 引言

饱和黄土主要分为两类^[1-2]:一类是饱和软黄土,即饱和度大于80%,湿陷性已退化,并且未经过长时间大的压实作用,土的大孔隙与结构基本保存完整的黄土;另一类饱和黄土,即黄土早期浸水湿陷之后,并且经过充分压密作用,孔隙比明显降低,压缩性下降,承载力提高的黄土。后者实际上已经是一种超压密状态的土,工程性质较好;但前者,即饱和软黄土由于其土体常呈软塑-流塑状、压缩系数比一般饱和黄土高而黏聚力较低,因此承载能力低,容易导致地基不均匀沉降和引发地表变形过大等工程灾害,甚至还会引起隧道工程的拱顶塌方和边墙滑动^[3]。

以西安兴庆湖在建蓄水对周边环境的影响为例,从1959年蓄水到1962年三年间,潜水位上升迅速,并由地基沉降引起了部分结构物开裂,根据任澍华等^[4]调查结果,许多建筑物的基础都出现了沉降,并发生不同程度承载功能受损。曲江南湖蓄水运营之后,也引起了大范围的地下水水位上升^[5],导致了类似灾害的发生,但由于影响范围内多为高层建筑,基础埋深大,影响相对较轻。

鉴于饱和软黄土特殊的工程性质,一些学者开展了关于其工程特性、成因机理及工程应对措施方面的研究。例如,于国新等^[6]对西安地区饱和软黄土的分布和物理力学特性做了相关研究;杨建华等^[7]采用现场实测手段研究了西安饱和软黄土地层矿山法地铁隧道施工诱发的地表沉降规律,并提出了相应的施工应对措施;高翔等^[8]、刘建伟等^[9]结合西安地铁五号线的建设,通过现场试验与室内试验,探讨了饱和软黄土降水前后性能的变化规律以及沉降特点;曹振等^[10]根据湿陷性黄土的特性及风险特征,提出了饱和软黄土失水固结沉降风险的应对措施和隧道开挖土层变形沉降风险的应对措施;贺农农等^[11]通过施工期现场地表沉降变形监测,分析了在饱和软黄土特殊地层条件下隧道浅埋暗挖法施工引起的该区段地表沉降变形规律以及地表沉降槽分布特征;王正伟^[12]通过研究湿陷性黄土及饱和软黄土的性能,提出了饱和软黄土浅埋大坡度暗挖的施工方法,有效地控制了饱和软黄土的变形。李慎岗^[13]对甘肃中马铁路沿线饱和软黄土的分布、工程

特性及处置措施进行了研究。以上学者对饱和软黄土开展的研究,给其他学者提供了宝贵经验。

勘察资料表明,咸阳市区二级阶地分布有大量的饱和软黄土,由于该类黄土强度低且具有触变性,对工程建设极为不利。但是咸阳地区的饱和软黄土并没有得到深入研究,目前还没有相关的研究成果。本文基于“咸阳城市地质调查项目”取得的大量调查、勘探和试验资料成果,总结了咸阳地区饱和软黄土空间分布特征与物理特性,分析了其主要特性,并对其成因机理进行了探讨。

1 饱和软黄土空间分布特征

根据项目成果和前人资料^[14],可以发现咸阳城区饱和软黄土平面主要分布于城区中西部的二级阶地,东到咸阳火车站,西到马泉镇,北至二级阶地后缘,南至胭脂河-二级阶地前缘(图1)。中部分布最多,连片出现;东部和西部片状零星出现;二级阶地后缘仅马泉镇、程家村、大泉村零星出现。分布区总体在渭河以北,并被渭惠渠、胭脂河和防洪渠包围在中间,该区地表水丰富,给地下水补充创造了条件。

剖面上看(图2),饱和软黄土的埋深大部分为3~7 m,最浅处为渭惠渠边的华家寨附近,埋深0.3 m;厚度一般为3~6 m,局部厚达10 m。埋深浅和厚度大的地段均分布在西部渭惠渠附近,显然这与渭惠渠的渗漏有很大的关系。涉及的地层主要为二级阶地上的晚更新世黄土。分布区地下潜水位总体在黄土之下的古土壤层附近,大部分饱和软黄土并没有直接位于潜水位之下,但基本处于水位线之上的毛细水上升高度范围以内。

2 饱和软黄土的物理力学特性

2.1 物理特性

根据勘察试验结果统计,咸阳城区饱和软黄土主要物理特性指标值列于表1。黄土长期处于饱和状态是饱和软黄土存在的先决条件,即饱和度大于80%,咸阳城区饱和软黄土天然含水量处于23.8%~33.7%之间,接近于液限值,平均饱和度在95%左右。孔隙比范围为0.70~1.16、平均值为0.85,具有较大孔隙性。液性指数平均值在0.89左右,最大1.44,表明土体处于软塑甚至是流塑状态。

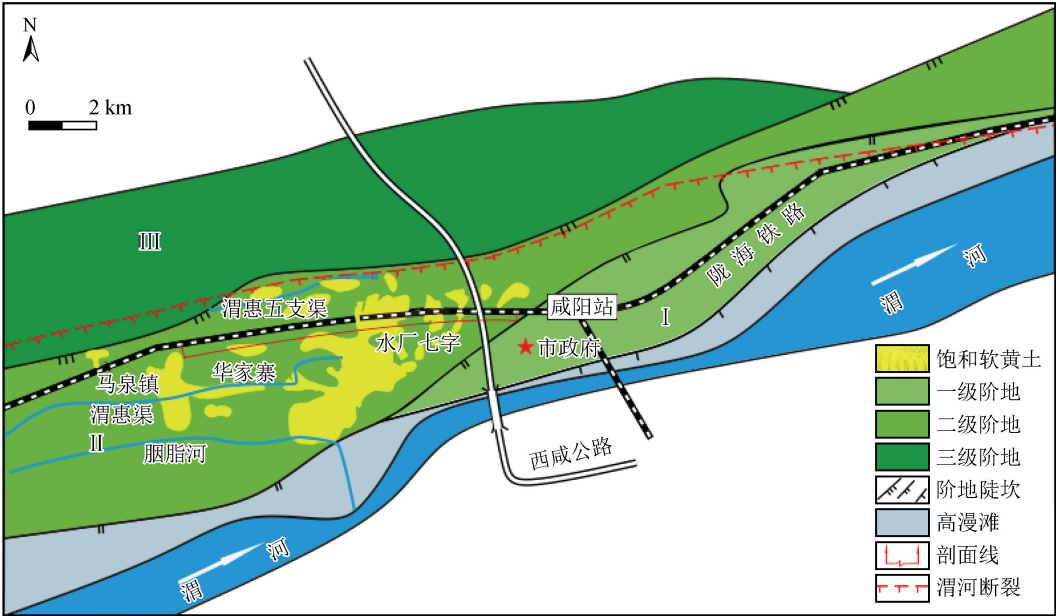


图 1 咸阳市饱和湿软黄土分布平面图

Fig.1 Distribution plan of the saturated wet-soft loess in Xianyang City

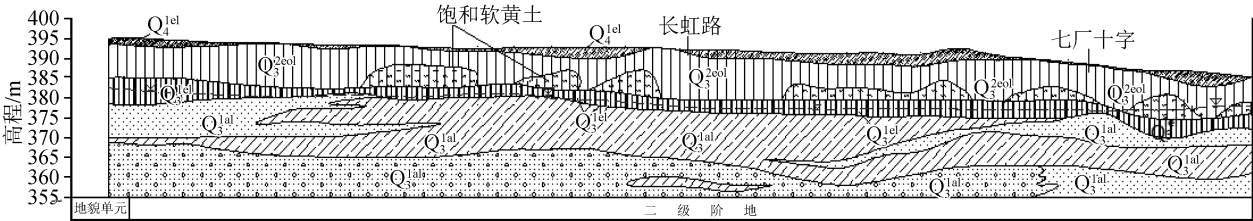


图 2 咸阳市饱和湿软黄土分布剖面图(东西向)

Fig.2 Distribution profile of the saturated wet-soft loess in Xianyang City (E-W direction)

表 1 饱和软黄土主要物理特性参数表

Table 1 Physical properties of saturated soft loess

名称	天然含水量 $w/\%$	天然重度 γ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e	液限 ω_L $/\%$	塑限 ω_P $/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
最小值	23.80	16.60	80	0.70	24.10	12.80	8.00	0.75
最大值	33.70	21.50	100	1.16	34.30	22.00	16.3	1.44
平均值	28.10	19.30	95	0.85	29.40	17.60	11.8	0.89

2.2 力学特性

饱和软黄土由于高饱和度常呈软塑-流塑状,力学性质比一般黄土差,试验统计表明咸阳市饱和软黄土压缩系数平均为 0.38 MPa^{-1} ,压缩模量平均值为 5.07 MPa ,三轴压缩试验得到的内摩擦角与黏聚力平均值分别为 11.1° 和 27.7 kPa 。说明软黄土具有中偏高压缩到高压缩性,并具有较低的抗剪强度。主要力学特性指标统计值列于表 2。

2.3 与普通饱和黄土物理力学特性的比较

根据试验,统计得到的咸阳市饱和软黄土区范围内第二类饱和黄土的物理力学特性值列于表 3。

由表 3 与表 2 数据比较饱和黄土与饱和软黄土物

理力学性质可知,两者饱和度都比较高,平均为 95%和 90.54%;饱和软黄土孔隙比为 0.85,比普通饱和黄土 0.78 要大 0.07,饱和软黄土压缩系数较大,说明饱和软黄土的大孔隙依旧存在,具有更大的压缩性;普通饱和黄土三轴黏聚力平均为 31.57 kPa ,三轴内摩擦角为 15.33° ,分别比饱和软黄土要大 14%和 38%。

表 2 饱和软黄土力学特性指标

Table 2 Mechanical properties of saturated soft loess

名称	压缩系数 $/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $/\text{MPa}$	压缩指数 G_c	黏聚力 $/\text{kPa}$	内摩擦角 $/(^{\circ})$
最小值	0.30	3.70	0.213	21.0	10.0
最大值	0.85	8.70	0.716	37.6	12.4
平均值	0.38	5.07	0.390	27.7	11.1

表 3 普通饱和黄土力学特性指标

Table.3 Mechanical properties of saturated loess

名称	天然含水量 $w/\%$	天然重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩系数 $/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $/\text{MPa}$	三轴黏聚力 $/\text{kPa}$	三轴内摩擦角 $/(^{\circ})$
最小值	17.60	17.50	80.00	0.53	0.25	0.85	0.90	36.00	13.70
最大值	30.30	20.80	100.0	0.98	0.530	0.120	15.28	50.00	29.00
平均值	26.20	19.16	90.54	0.78	0.71	0.31	6.19	31.57	15.33

3 饱和软黄土的成因分析

饱和软黄土的形成一是要有湿陷性黄土这一物质条件,二是要有高地下水位这一环境条件。咸阳二级阶地地层具有典型的二元结构,上部为上更新统风积黄土,下部为冲积层,黄土层底部为一层厚 1~5 m 的古土壤。这一地层结构特点,既具备了湿陷性黄土这一物质条件,又为地下水的聚集创造了条件,使得饱和软黄土的形成具有了可能性。

从放大 1 000 倍的电镜扫描结果[图 3(a)]看,

未扰动的黄土大孔隙较多,具有明显的分散结构或架空结构特征,属于典型的欠稳定结构,遇水浸泡湿陷的可能性大;而饱和软黄土的大孔隙明显变少,具有镶嵌结构的特征[图 3(b)],土体基本已经不再具有湿陷性,但由于颗粒体之间原来的胶结破坏,土体含水量高,颗粒接触处的“黏粒膜”强度低,外力作用下容易滑移,因此,仍然属于一种欠稳定结构,其强度较黄土更低。受地形、河流及固结历史等因素的影响,二级阶地上黄土的湿陷性变化较大,大体上具有北部湿陷性大、南部湿陷性小、东部湿陷性大和西

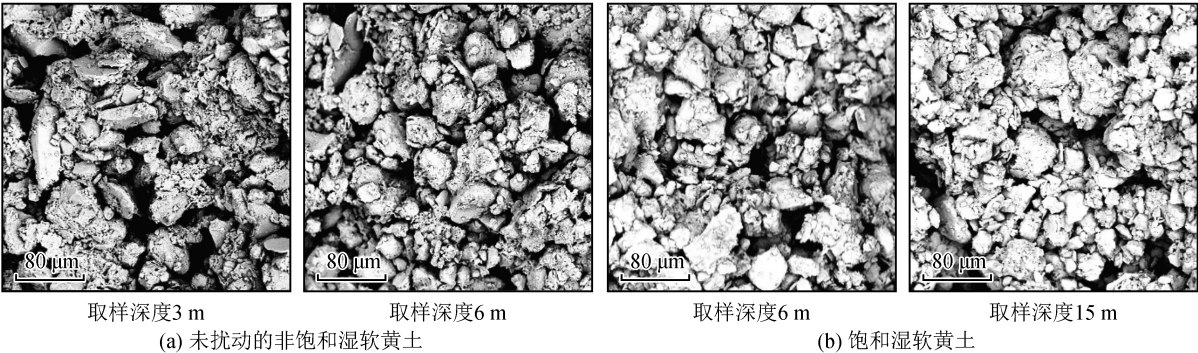


图 3 黄土结构电镜扫描结果(放大 1 000 倍)

Fig.3 Loess structure scanned by electron microscopy (Magnified by 1 000 times)

部湿陷性小的特点,属于一级到二级非自重湿陷场地。咸阳二级阶地黄土湿陷性的特征与饱和软黄土的分布具有较好的相关性。

地下水对饱和软黄土形成的影响主要是水位的大幅上升,特别是水位近期大幅上升的影响,比如灌溉工程的竣工运营^[15]。如果历史上较为久远的水位变化,黄土湿陷后长期压缩固结,强度会逐渐上升,从而退化为一般的饱和黄土。咸阳市位于西北干旱地区,历史上地下水位较深,没有形成软黄土。根据陕西省地下水位年鉴,二级阶地地下水位变动情况如图 4 所示。20 世纪 70 年代后,随着灌溉工程的修建运营,地下水位抬升较快,从而产生了饱和软黄土,尽管后来随着抽取地下水的增加,水位又出现较大范围的降落,但由于饱和软黄土固结缓慢,因此仍然维持饱和软黄土状态。另外,地表渠道的渗漏,造成局部地段黄土含水量接近饱和,从而形成埋

深浅、厚度大的饱和软黄土,例如渭惠渠附近地段。2006 年后,随着地下水的限制开采,水位逐渐回升,目前,很多地段地下水位已经回升到古土壤层之上,因此可以预见将来咸阳城区的饱和软黄土区范围还可能增加,这是需要值得注意的问题。

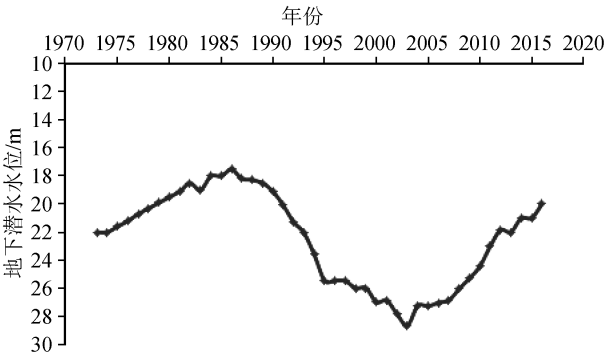


图 4 咸阳二级阶地潜水位动态曲线

Fig.4 Dynamic curve of groundwater level of secondary terrace in Xianyang City

4 结 论

(1) 咸阳市城区饱和软黄土的分布主要位于二级阶地的中东部,总体在渭河以北,并被渭惠渠、胭脂河和防洪渠包围在中间。

(2) 咸阳市饱和软黄土的物理力学特性与普通饱和黄土物理力学差异大,其平均孔隙比为 0.85、压缩模量为 5.07 MPa,具有较大的孔隙比和压缩性,强度也较低。

(3) 饱和软黄土分布与地下水位变动历史、地层结构及黄土的湿陷性有较大的关系,根据咸阳城区地下水位近 50 年的变化趋势,初步判断饱和软黄土的形成与 20 世纪 70 年代灌溉工程的修建和运营有关。

参考文献(References)

- [1] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].第四版.北京:中国建筑工业出版社,2007.
Editorial Committee of Geological Engineering Handbook. Geological engineering handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [2] 高虎艳,邓国华.饱和软黄土的力学与工程性质分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(3):38-42.
GAO Huyan, DENG Guohua. Analyses for mechanical and engineering characteristics of saturated soft loess[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(3): 38-42.
- [3] 郑云峰,谌文武,刘小伟.引洮工程 15[#]饱和黄土隧洞主要病害及防治措施[J].西北地震学报,2011,33(增刊 1):340-344.
ZHENG Yunfeng, CHEN Wenwu, LIU Xiaowei. The main disease and prevention measures in 15[#] saturated loess tunnel of Yintao water supply project[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Suppl01): 340-344.
- [4] 任澎华,李忠明.湿陷性黄土地区人工湖渗漏引发的环境工程地质问题:以西安兴庆湖对湖周建筑地基条件的影响为例[J].工程地质学报,2002,10(增刊 1):569-572.
REN Shuhua, LI Zhongming. Seepage from Mam-Mere Lake induced geoenvironmental and engineering problems in collapsible loess area[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(Suppl01): 569-572.
- [5] 周彦龙.西安市地下潜水系统对城市化进程的响应[D].西安:长安大学,2018.
ZHOU Yanlong. Xi'an underground phreatic water system response to urbanization[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [6] 于国新,白明洲,许兆义.西安地区饱和软黄土工程地质特征研究[J].工程地质学报,2006,14(2):196-199
YU Guoxin, BAI Mingzhou, XU Zhaoyi. Engineering characteristics of saturated soft loess in Xi'an region[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 196-199.

- [7] 杨建华.饱和软黄土地层地铁隧道施工诱发的地表变形[J].西安科技大学学报,2018,38(1):91-98.
YANG Jianhua. Surface deformation induced by tunnel construction in saturated soft loess strata[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(1): 91-98.
- [8] 高翔,宁波,高涵.饱和软黄土降水效果对比分析研究[J].科技创新导报,2019,16(18):69-73.
GAO Xiang, NING Bo, GAO Han. Comparative analysis and study on precipitation effect of saturated soft loess[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(18): 69-73.
- [9] 刘建伟,李冀伟,卢致强,等.饱和软黄土地层降水及引起周边环境沉降特点:以西安地铁 5 号线为例[J].科学技术与工程,2019,19(25):334-340.
LIU Jianwei, LI Jiwei, LU Zhiqiang, et al. The characteristics of dewatering in saturated soft loessial strata and settlement of surroundings caused by it: take Xi'an Metro Line 5 as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25): 334-340.
- [10] 曹振,雷斌,张丰功.地铁湿陷性黄土暗挖隧道的施工风险及控制措施[J].城市轨道交通研究,2013,16(3):97-99.
CAO Zhen, LEI Bin, ZHANG Fenggong. Construction risks and control measures of the metro bored tunnel in collapsible loess[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(3): 97-99.
- [11] 贺农农,李攀,邵生俊,等.西安地铁隧道穿越饱和软黄土地段的地表沉降监测[J].地球科学与环境学报,2012,34(1):96-103.
HE Nongnong, LI Pan, SHAO Shengjun, et al. Ground settlement monitoring above Xi'an metro tunnel through the saturated soft loess[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 96-103.
- [12] 王正伟.饱和软黄土浅埋大坡度暗挖施工工法研究[J].绿色环保建材,2017(2):103-104.
WANG Zhengwei. Study on construction method of shallow buried and large slope underground excavation in saturated soft loess[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2017(2): 103-104.
- [13] 李慎岗.中马铁路饱和软黄土浅析[J].铁道勘察,2015,41(2):53-55.
LI Shengang. Analysis of saturated soft loess in Zhongma railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2015, 41(2): 53-55.
- [14] 咸阳市城乡规划局.咸阳市城市工程地质图集[M].北京:地质出版社,2003.
Xianyang Urban and Rural Planning Bureau. Atlas of urban engineering geology in Xianyang City[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [15] UENO M, NISHIMURA T, KATO M, et al. 灌溉后的黄土剪切特征变化(英文)[J].西北地震学报,2005,27(2):128-134.
UENO M, NISHIMURA T, KATO M, et al. Variation of shearing characteristics of loess soil after irrigation[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(2): 128-134.