

# 青海省共和地区农村民居特征与抗震性能分析<sup>1</sup>

王 洪 王成虎 安易飞 陈 念 周 昊

(应急管理部国家自然灾害防治研究院, 地壳动力学重点实验室, 北京 100085)

**摘要** 青海省共和地区位于柴达木—阿尔金地震带内, 具备发生中强地震的构造背景, 近年来该地区地震活动频繁, 农村地区受经济和技术等条件的限制, 造成了巨大的人员伤亡和经济损失。为深入了解共和地区农村民居结构特征与抗震性能现状, 开展实地调查, 基于历史震害资料, 总结区域内典型农村民居震害特点, 并进行震害预测, 得到不同地震烈度下农村民居不同的破坏结果。结果表明: 青海省共和地区农村民居中的砖混结构和砖木结构房屋数量约占48%、47%, 其中约68%砖混结构房屋未设置构造柱和圈梁等抗震设防措施; 该地区主要农村民居基本达到Ⅶ度抗震设防要求, 仅部分建造年代久的土木结构房屋破坏严重; 地震烈度为Ⅷ度时, 大部分房屋以中等破坏和严重破坏为主; 地震烈度为Ⅸ、Ⅹ度时, 农村民居将发生大范围严重破坏, 甚至毁坏。

**关键词:** 农村民居 建筑特征 震害预测 抗震性能

## Analysis of Structural Characteristics and Seismic Performance of Rural Residential Buildings in Gonghe County, Qinghai Province

Wang Hong, Wang Chenghu, An Yifei, Chen Nian and Zhou Hao

(Key laboratory of Crustal Dyrramics, National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China)

**Abstract** The Gonghe County of Qinghai Province is located in the Qaidam-Altun seismic zone, and has the tectonic background of moderate to strong earthquakes. In recent years, there have been frequent earthquake activities in Qinghai, and rural areas are restricted by economic and technological conditions, causing huge casualties and economic losses. In order to investigate the structural characteristics and seismic performance of rural residential buildings in Gonghe region, a field survey of rural houses of Qinghai Province was conducted. In addition, based on historical seismic damage data, the seismic damage characteristics of typical rural residential buildings in Qinghai Province are summarized. Finally, the seismic damage prediction analysis of buildings in the rural region that our team investigated by using the theory of seismic damage prediction was conducted, and the different damage results of the rural buildings in the different earthquake intensity ranges in Gonghe region were obtained. The results show that: The number of brick masonry buildings and brick-wood structural buildings of rural residential buildings in Gonghe region of Qinghai accounts for 48% and 47% of the total number of houses. Nearly 70% of the brick masonry buildings are not provided with seismic fortification measures such as structural columns and ring beams. The prediction results show that the main rural residential buildings basically meets the requirements of 7-degree seismic intensity protection, and only part of the soil-wood structural building built in disrepair will have severe damage; For 8-degree areas, most buildings will have medium-severe damage; For 9-or 10-degree areas, there will be extensive severe damage or even be destroyed of rural residential buildings in Gonghe County. The above research results can provide a basis for the earthquake prevention and disaster reduction work of rural residential buildings in Qinghai.

**1 基金项目** 国家自然科学基金资助项目(41574088)

**[收稿日期]** 2020-07-20

**[作者简介]** 王洪, 男, 生于1994年。硕士研究生。主要从事地震工程方面的研究工作。E-mail: wanghongxkd@163.com

**[通信作者]** 王成虎, 男, 生于1978年。研究员。主要从事地应力与地质力学、断层力学等方面的研究工作。E-mail: huchengwang@163.com

**Key words: Rural houses; Building characteristics; Earthquake damage prediction; Seismic performance**

## 引言

青海省地处我国最大的地震区——青藏高原地震区，整体处于活跃的南北地震带上，地震活动频繁，强震（ $M_s \geq 6.0$ ）数量居全国第7位（苏延芬等，2013）。据中国地震局台网中心汇编数据统计资料显示，1990年以来，青海省发生5.0级以上地震58次，其中 $M_s 5.0 \sim M_s 5.9$ 级地震50次、 $M_s 6.0 \sim M_s 6.9$ 级地震6次、 $M_s 7.0 \sim M_s 7.9$ 级地震2次。目前，部分学者对青海省农村民居进行大量实地调研，收集整理调查资料，并深入分析各类房屋结构特征及抗震性能，取得了许多有价值的研究成果。钟秀梅等（2019）将我国西北地区（青海省、甘肃省、陕西省）农村民居结构细分为6大类、15小类，并通过计算平均震害指数评估了各类房屋抗震能力，其中采取抗震构造措施的砖混结构和砖围护木结构房屋抗震性能最优，同时建议单独统计城镇和农村房屋震害特征。杨娜等（2018）总结了青海东南部地区农村民居结构特点，给出土墙围护木构架结构房屋震害矩阵，并对其进行抗震能力分析。邱舒睿等（2015）对青海省农村民居地震灾害易损性进行了研究，总结了青海地区历年地震破坏比，评估了各乡级农村民居灾害易损性。朴永军（2013）、郭宁（2012）基于青海省农村民居现场调查和文献调研情况，总结得到了青海省房屋震害矩阵。目前，对于青海省农村民居系统性的震害预测研究仍处于空白，由于青海地区地震活动频繁，尤其是农村地区，农村民居受建造年代、经济条件和地理位置等限制，导致其抗震能力弱，更易受到破坏。因此，对现有农村民居开展抗震调查工作具有重要的现实意义。

青海省东部的共和地区地质构造背景复杂，断层较发育，区内水系丰富，建有中型水利发电站，使该地区具有水库诱发地震环境背景，且区域内地热资源丰富。因此，须对青海省共和地区开展农村民居抗震设防调查。本文以青海省共和地区农村民居为研究对象，根据现场调查数据及1990年以来青海省中强地震现场震害调查数据统计分析结果，揭示典型农村民居结构特点和1990年以来的震害特征，并开展抗震性能分析，给出不同结构类型农村民居震害预测结果，以期为农村民居抗震研究和防震减灾工作提供依据。

## 1 现场调查

### 1.1 调查范围与内容

调查对象主要为青海省共和地区农村民居庄廓院房屋，调查目的是通过开展抗震设防能力评估工作，为后期改扩建工作提供参考，同时揭示海南藏族自治州共和县农村民居抗震设防能力是否符合危房改扩建项目指标及地区抗震设防烈度要求。青海省共和地区覆盖4个镇、42个村，依据区域地震地质、人口经济情况、建筑特征等信息，本文选取恰卜恰镇、倒淌河镇、龙羊峡镇、塘格木镇的龙洋新村、次汗苏村、阿乙亥村等人口最集中的13个自然村作为房屋抗震设防能力调查区，房屋按Ⅶ度抗震设防，每个村各类房屋抽样数量占比为20%~30%，抽样调查综合考虑了既有和在建农村民居建造年代、建筑特征、建筑分布等，具有较好的代表性。

本次调查于2019年6—7月进行，调查方式主要采取调查人员进村入户实地查看，通过现场拍摄、访谈，获取抗震设防信息。调查内容主要包括农村民居结构类型、建造时间、建造方式等，此外，对居住人口数量、人员流动情况、民族分布情况、习俗、地理环境、经济收入来源、总收入、子女教育等经济社会发展基本情况进行了了解。

### 1.2 调查结果

现场调查数据表明，农村民居主要以砖混结构和砖木结构房屋为主（表1），具体表现为：（1）砖混结构和砖木结构房屋约占48%、47%，其中约68%的砖混结构房屋未设置钢筋混凝土构造柱和圈梁，仅5%的砖木结构房屋设置构造柱和圈梁；（2）土木结构房屋仅占5%左右，个别村土木结构房屋占比较大，如次汗素村土木结构房屋占比高达30%，且仍作为民居使用；（3）各村人口数量较少，每户家庭平均年收入约3万元，经济条件相对落后。

根据各调研点年收入情况统计建筑结构类型占比，结果如图1所示。由图1可知，年收入低于2万元的村落房屋以砖木结构为主，占比达75%；年收入高于2万元的村落房屋以砖混结构为主，占比达71%；经济条件较差的村落，农村民居抗震性能较差。

表 1 农村民居房屋结构类型现状

Table 1 Types and proportion of rural buildings in different villages in Gonghe region of Qinghai province

村镇	户籍人口/人	年收入/万元	房屋数/栋	砖混结构占比/%	砖木结构占比/%	土木结构占比/%
龙羊新村	700	2~3	230	80	15	5
西台村	1 376	4~5	360	60	35	5
东巴村	1 000	1~2	300	1	94	5
西香卡村	1 200	4~5	200	50	45	5
次汗素村	714	2~3	217	40	30	30
阿乙亥村	1 041	3~4	286	70	30	0
沙有村	398	1~2	104	15	85	0
上合乐寺村	908	1~2	273	8	90	2
克才村	713	1~2	213	30	60	10
次汉土亥村	1 400	2~3	340	90	5	5
下塔迈村	1 021	4~6	247	90	5	5
上塔迈村	1 610	3~4	428	60	40	0
尕当村	1 104	2~3	237	10	90	0

## 2 结构类型

青海省农村地区最具民族特色的房屋为庄廓院，即由高大的夯土围墙和厚实的大门围合成的合院式民居，如图 2 所示。典型的庄廓院坐北朝南，围墙平面布局形式呈正方形或长方形，传统庄廓院围墙选用当地黄土夯筑而成，但因黄土疏松多孔、黏聚性较差，围墙呈上窄下宽形式，高 4~5 m，厚 80~100 cm。青海省地震活动频繁，农村地区经济条件落后，政府在 2009—2014 年出台农村危旧房改造补贴政策，农村地区 80% 左右的庄廓院围墙逐渐由夯土墙改建为砖墙，高 3~4 m，厚 120 mm 或 240 mm，提高了抗震性能。调研发现，传统和改建庄廓院布局特点基本不变，主要由院墙、房屋和庭院组成，房屋靠围墙建造，布局呈一字形、L 形、二字形、凹字形和口字形。沿北侧院墙建造正房（北房或上房），正房内部布局主要包括客厅、卧室、厨房；东墙和西墙建厢房，常用作杂物间，部分用作居住；南墙建房多用作牲畜棚或草料房（崔文河，2015；左丹，2015）。

青海省共和地区有放牧和半农半牧 2 种生产方式，不同农业区有不同的房屋结构形式，本次调研区域主要为半农半牧地区，房屋布局主要为庄廓院形式，以土木结构（图 3（a））、砖木结构（图 3（b））和砖混结构（图 3（c））为主。农村民居特点如下：（1）土木结构为 20 世纪 80 年代修建，整体结构一般为双坡顶单层建筑，屋顶坡面较缓，坡度 6°~7°。主要承重结构为木柱和土坯墙，开间过大，进深达 5 m，间宽约 10 m。屋顶系统包括木梁、木檩条、苇席和草芥铺设的屋面。此类房屋建造年代久，主要承重构件抗震性能差，在地震作用下极易发生严重破坏。（2）砖木结构为 20 世纪 80—90 年代建造，整体结构一般为双坡顶+木屋架形式的单层建筑，地基仅简单夯实，基础为埋深较浅的毛石砌筑基础，无地圈梁。房屋主要承重构件是砖墙和木柱，墙体一般采用黏土砖和白灰砂浆砌筑，山墙和外横墙为 370 mm 厚砖墙，后纵墙厚度一般为 240 mm，内墙为 240 mm 厚砖墙或夯土墙，纵横墙连接处未采取预留马牙槎等拉结措施。屋顶常用平顶木构架，木梁放置于后纵墙和前纵墙的木柱上。（3）砖混结构房屋一般为双坡顶+木屋架形式的单层建筑，少数为 2 层建筑，地基埋深约 1.5 m，下部设地圈梁。房屋包括砖墙、砖柱、钢筋混凝土楼板或预制楼板、

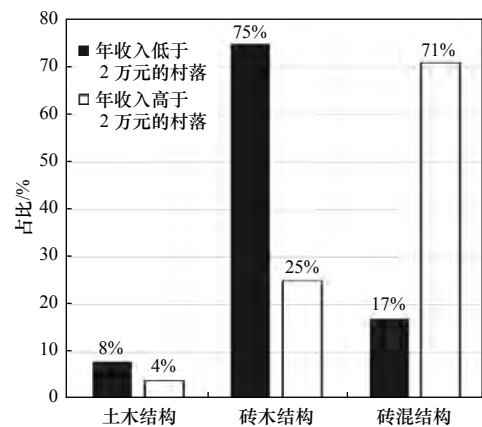


图 1 不同年收入村落房屋结构类型占比

Fig. 1 Proportion of building structure of villages with different annual income

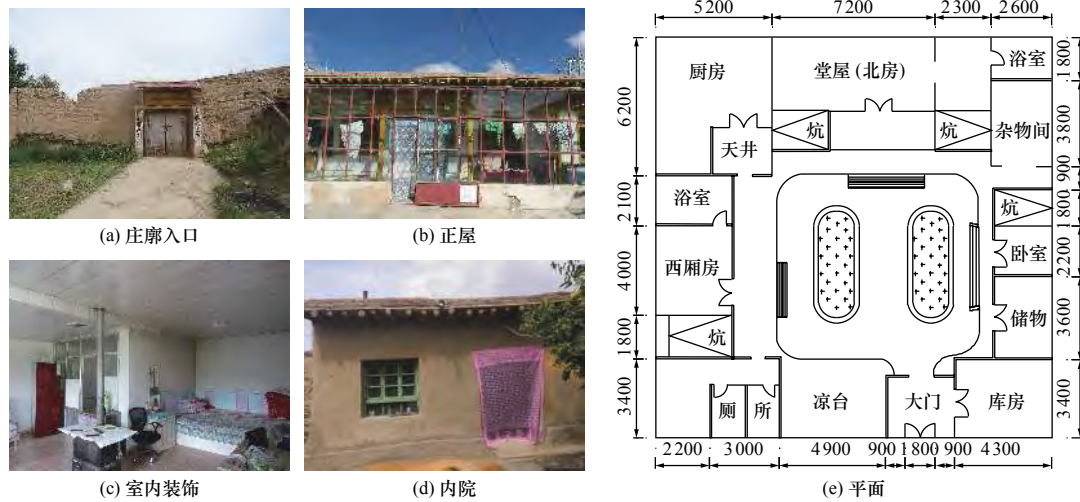


图 2 次汗苏村典型庄廓民居

Fig. 2 Typical Zhuangkuo folk house in the Cihan village



图 3 次汗素村房屋结构类型

Fig. 3 Structural types of rural houses in the Cihan Village

现浇钢筋混凝土梁，屋顶系统包括木屋架、木檩、瓦屋面。区域内大多数砖混结构房屋未设置构造柱、圈梁等抗震设防措施（杜晓霞，2016）。

### 3 房屋震害特征

在历次破坏性地震作用下，农村地区成为震害最严重的受灾区，发生破坏性地震的概率相对较大。本文通过收集青海地区近年来发生的破坏性地震震害资料（中国地震局监测预报司，1996，2001，2010；地震局震灾应急救援司，2015），得到了区域内典型农村民居震害特征（表 2）。

区域内 2 次特大地震为：（1）1990 年 4 月 26 日共和县塘格木镇 7.0 级地震，震中烈度达 IX 度，此次地震共造成 119 人死亡，149 人重伤，1 900 多人受伤，12 366 户共 45 000 多人经济受损，总经济损失高达 2 亿多元（刘志刚等，1990）；（2）2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震，最高烈度达 IX 度，受灾面积共 3.5 万  $\text{km}^2$ ，其中，极重灾区 992  $\text{km}^2$ ，重灾区 7 030  $\text{km}^2$ ，共造成 20 万人受灾，2 600 多人死亡，农村民居倒损 4.5 万户、共 29 万多间，总经济损失达 750 多亿元（白国良等，2011；朴永军，2013）。近年来的破坏性地震，震中位置多位于农村地区，受经济和技术等条件的限制，农村建筑物更易受到破坏。

### 4 震害预测

#### 4.1 震害预测方法

国内外对建筑物震害预测的研究始于 20 世纪 70 年代，目前关于震害预测的研究方法种类繁多（王强等，2011），本文针对不同房屋结构类型，选取不同的震害预测方法（邵峰，2017），对于砖混结构房屋，依据唐月等（2012）的研究成果，尹之潜等（1990）提出的楼层平均抗剪强度法；对于砖木结构和土木结构房屋，依托王强等（2009，2011）和郭小东等（2011）的研究成果，选取较常用的模糊震害预测法，基于青海省共和地区震害资料，建立建筑结构影响因子与震害指数之间的关系，应用模糊评价模型理论，给出区域内砖木

表 2 1990 年以来青海省中强地震统计结果

Table 2 Statistics of middle-strong earthquakes of Qinghai since 1990

发震时间/ 年-月-日	发震地点	震级	极震区烈度	主要房屋震害情况	地震损失/ 万元
1990-04-26	塘格木	7.0	IX	砖柱土坯结构平房大量倒塌，砖混结构房屋屋顶局部塌落，墙身多数开裂，极震区土坯房几乎全部倒塌	7 792.46
1997-10-13	玛多县	4.2	VI	地基下陷，墙体发生倾斜和裂缝，少数房屋出现倒塌	194.54
1997-12-06	玛多县	4.4	VI		
1999-09-27	河南蒙古族自治县	5.1	VI	房屋出现裂缝，墙体严重倾斜并与木架屋体分离，室内墙体有贯穿的水平走向横断裂缝	114.14
1999-11-26	玛沁县	5.0	VI	多数房屋墙体开裂、墙砖松动，极个别房屋出现附属房倒塌	1 233
2000-04-15	玉树州杂多	5.3	VII	大多数房屋墙体出现细小裂缝，木屋顶有梭瓦现象	324.1
2000-09-12	兴海县	6.6	VIII	土坯房遭受严重破坏，其余建筑以墙体开裂、木架屋顶梭瓦为主	541.93
2003-04-17	德令哈	6.6	VIII	大量墙体出现弯曲水平裂缝与剪切斜裂缝，墙体与砖柱脱离；屋架下弦檐口处墙体出现竖向裂缝	7 324.34
2004-05-11	德令哈	5.9	VII	旧房墙体出现严重开裂，部分房屋倒塌	5 911.8
2006-07-18	玉树州日玛村	5.0	VII	房屋承重墙与房梁、墙角及门窗连接处墙体开裂严重，部分墙体倒塌，出现墙倒房倒、柱倒房塌的震害现象	4 253.89
2006-07-19	玉树州日玛村	5.6、5.4	VII		
2008-11-10	海西州大柴旦	6.3	VII	大量土木结构房屋出现墙体开裂，局部倒塌现象	26 611.32
2009-08-28	海西	6.4	VII	极震区房屋破损严重，墙面出现斜裂缝、水平裂缝，木屋架塌落	23 368.05
2010-04-14	玉树	7.1	IX	30多万间民居出现不同程度损伤，20多万间民居倒塌	7 551 000
2011-06-26	囊谦县	5.2	VI	老旧房屋毁坏情况严重，多数房屋出现墙体倒塌	6 502.81
2016-01-21	门源县	6.4	VIII	墙体开裂，有竖向裂缝、横向裂缝和斜向裂缝，围墙倒塌	122 251.09
2016-10-17	玉树州杂多县	6.2	VII	大多数房屋墙体出现贯穿裂缝，少数房屋开裂	28 466
2018-05-06	玉树州称多县	5.3	VI	房屋主体结构局部开裂，多数墙体出现长裂缝，木屋顶梭瓦现象明显	11 754.5

结构和土木结构房屋震害预测结果。

4.1.1 砖（土）木结构房屋

模糊震害预测法是基于模糊数学的方法，应用隶属度理论将单因素定性评价转化为定量评价，并对单因素评价结果加权求和，取得综合评价结果（王强等，2011），具体步骤如图 4 所示。

本文通过收集青海省共和地区及周边区域近年来破坏性地震房屋震害资料，包括塘格木地震、玛沁地震、兴海地震、青海玉树地震、青海门源地震、杂多地震等（中国地震局监测预报司，1996，2001，2010；秦松

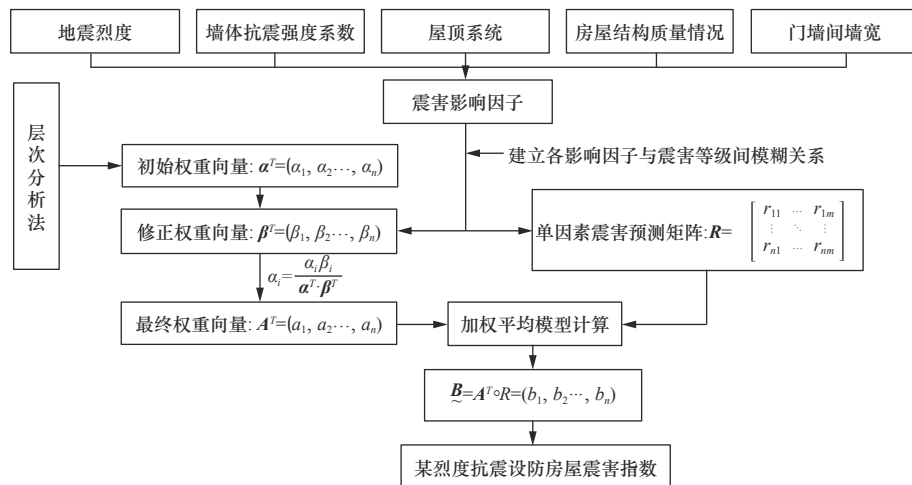


图 4 砖（土）木结构房屋震害预测计算流程

Fig. 4 Flow chart of earthquake damage prediction calculation for brick-timber structure and civil-timber structure house

涛等, 2010; 地震局震灾应急救援司, 2015), 并结合邱舒睿等 (2015) 对青海地区不同房屋结构类型破坏比的统计, 得到土木结构、砖木结构房屋在不同地震烈度下的各状态破坏比, 如表 3 所示。

表 3 土木结构、砖木结构房屋震害矩阵 (%)

Table 3 Earthquake damage matrix of civil and brick-wood structures (Unit:%)

地震烈度	结构类型	破坏等级				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
VI	砖木结构	67.5	22.0	8.9	1.4	0.2
	土木结构	48.8	30.0	17.1	3.5	0.6
VII	砖木结构	32.1	32.9	25.1	8.1	1.8
	土木结构	10.2	33.6	31.5	19.5	5.2
VIII	砖木结构	8.8	21.7	30.2	29.5	9.8
	土木结构	3.3	6.0	25.0	36.7	29.0
IX	砖木结构	0.7	7.3	19.6	40.1	32.3
	土木结构	1.3	3.4	14.3	23.5	57.5
X	砖木结构	0.4	1.4	9.7	26.3	62.2
	土木结构	0.0	0.4	1.0	8.3	90.3

#### 4.1.2 砖混结构房屋

砖结构房屋主要承重构件是墙体, 在地震作用下, 以墙体剪切破坏为主, 因此可将砖墙抗剪强度值作为砖结构房屋抗震能力的量值。本文采用楼层平均抗剪强度法对砖混结构房屋进行震害预测, 计算过程如下:

##### (1) 砖墙平均抗剪强度 $\alpha_{cs}$ 的计算

砖混结构房屋第  $i$  层单位面积砖墙的平均抗剪强度 $\alpha_i$ 为:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^m F_j}{2A_i} \tau \quad (1)$$

式中:  $F_j$  为第  $i$  层第  $j$  片砖墙断面积 ( $\text{cm}^2$ );  $A_i$  为第  $i$  层建筑面积 ( $\text{m}^2$ );  $m$  为第  $i$  层砖墙总片数;  $\tau$  为墙体抗剪强度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )。

$$\alpha_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^n i^2}{\sum_{i=1}^n i \cdot \sum_{i=s}^n i} \alpha_i \quad (2)$$

$$\tau = 0.14(n-s+1) + 0.014f + 0.5 \quad (3)$$

式中:  $n$  为楼层总数;  $s$  为计算层数;  $f$  为相应楼层墙体砂浆强度等级。

##### (2) 震害指数 $D_s$ 的确定

不同烈度下的 $\alpha_{cs}$ 与震害指数  $D_s$  关系如下 (尹之潜, 1996):

$$\begin{cases} D_s(\text{VI}) = 1.864 - 0.007\alpha_{cs} \\ D_s(\text{VII}) = 1.977 - 0.006\alpha_{cs} \\ D_s(\text{VIII}) = 1.975 - 0.005\alpha_{cs} \\ D_s(\text{IX}) = 1.866 - 0.004\alpha_{cs} \\ D_s(\text{X}) = 1.740 - 0.003\alpha_{cs} \end{cases} \quad (4)$$

##### (3) 震害指数的修正

考虑青海省共和地区农村民居多为自建房, 震害特征受施工质量和设计标准等因素影响较大, 应对不同

农村民居震害指数进行修正，修正公式如下：

$$D_{sm}(I) = D_s(I) \left( 1 + \sum C_i \right) \quad (5)$$

式中： $C_i$  为修正系数，取值如表 4 所示。

#### (4) 震害等级的确定

震害等级与其对应的震害指数之间的关系（尹之潜等，1990）如表 5 所示。根据现场调查结果，给出农村民居基本参数，如表 6 所示。

表 4 修正系数取值  
Table 4 Correction factor value

修正因素	修正系数 $C_i$	
	满足规范要求	不满足规范要求
横墙最大间距	0	0.10
楼、屋盖刚性	0	0.15
平、立面规整性	0	0.10 ~ 0.20
结构施工质量	0	0.20
符合《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）	-0.35	0
符合《建筑抗震设计规范》（GBJ 11—89）要求，但不符合《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）要求	-0.20	0

表 5 建筑物震害等级与其相应的震害指数  
Table 5 Earthquake damage grade of building and corresponding earthquake damage index

项目	震害等级				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
震害指数	0	0.2	0.4	0.7	1.0
指数范围	$D \leq 0.1$	$0.1 < D \leq 0.3$	$0.3 < D \leq 0.55$	$0.55 < D \leq 0.85$	$D > 0.85$

表 6 农村民居基本参数  
Table 6 Parameters of rural residential buildings

基本参数	砖混结构（设防）		砖混结构（未设防）		砖木结构	土木结构
	结构1	结构2	结构3	结构4	结构5	结构6
建筑年份	2014	2004	2000	2000	1990	1990
房屋层数	2	1	2	1	1	1
建筑层高/m	3~4	3~4	3~4	3~4	2~3	2~3
墙体砌筑	实心	实心	实心	实心	实心	土坯
外墙厚度/cm	24	24	24	24	24	38
内墙厚度/cm	24	24	24	24	18	12
墙体抗剪强度/MPa	0.11	0.08	0.06	0.06	0.06	无
楼面（屋顶）材料	钢筋混凝土	钢筋混凝土	预制楼板	预制楼板	轻质瓦屋顶	轻质瓦屋顶
配筋间距/cm	15	15	—	—	—	—
柱尺寸/cm	35×35	35×35	—	—	—	—
门洞尺寸/m	2.5×3.5	2.5×3.0	2.5×3.0	2.5×3.0	1.5×2.1	1.2×2.1
窗口尺寸/m	2.1×2.5	1.8×2.1	1.5×1.8	1.5×1.8	1.2×1.5	0.8×1.2
基础	地梁	砖砌	毛石	毛石	毛石	毛石
圈梁	钢筋混凝土	钢筋混凝土	无	无	无	无
单层面积/m <sup>2</sup>	185	142	128	92	92	80

## 4.2 震害预测结果

### (1) 砖混结构房屋

基于砖混结构房屋基本参数(表6),分别对2层和单层砖混结构(结构1~结构4)房屋进行震害预测分析,结果如表7所示。由表7可知,农村民居采用高强度砌块和砂浆并设置圈梁、构造柱等抗震措施,在改善房屋抗震方面起到明显作用,极大地提高了结构抗剪强度。

表7 砖混结构房屋震害预测结果

Table 7 Earthquake damage prediction results of rural masonry buildings

建筑物类型	项目	地震烈度				
		VI	VII	VIII	IX	X
结构1	震害指数	<0.100 0	0.278 6	0.431 5	0.538 9	0.632 5
	震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	中等破坏	严重破坏
结构2	震害指数	<0.100 0	<0.100 0	0.225 0	0.466 0	0.589 4
	震害等级	基本完好	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
结构3	震害指数	0.182 5	0.513 4	0.612 7	0.702 4	0.781 6
	震害等级	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	严重破坏	严重破坏
结构4	震害指数	0.231 4	0.507 4	0.671 2	0.763 2	0.897 5
	震害等级	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	严重破坏	毁坏

砖混结构房屋震害预测结果表明,结构类型相同、建筑年份与抗震构造措施不同时,震害结果差异较大。地震烈度为VI度时,结构整体处于基本完好状态,不受影响;地震烈度为VII度时,结构局部出现轻微破坏,墙体产生细裂缝;地震烈度为VIII度时,结构主要表现为轻微破坏~严重破坏,墙体局部开裂,抗震措施薄弱的房屋需采取一定的修复措施,建造时间长及抗震措施差的房屋破坏,且墙体出现多道裂缝;地震烈度为IX度时,房屋表现为中等破坏~严重破坏,墙体开裂,甚至部分严重倾斜,屋面梭瓦现象明显,已处于危险状态,不宜居住;地震烈度为X度时,房屋表现为中等破坏~毁坏,墙体开裂或倒塌,楼板开裂或滑动。

### (2) 砖木结构房屋

砖木结构房屋震害预测结果如表8所示,由表8可知,砖木结构房屋抗震性能较未设防的砖混结构房屋差,地震烈度为VII度时,房屋表现为中等~严重破坏,整体破坏程度低,砖墙出现局部裂缝,门窗洞口处裂缝沿角落呈斜向扩展,木架屋顶出现瓦片错动或滑落现象;地震烈度为VIII度时,房屋表现为严重破坏,墙体多处开裂,砌块发生剪切破坏,导致墙体产生斜向裂缝或X形裂缝,甚至严重倾斜或倒塌;屋面出现瓦片大面积滑落,局部檩条坠落,房屋表现为危房状态,不宜居住;地震烈度为IX度时,房屋表现为倒塌,砖墙部分发生倒塌,屋面部分或整体发生坠落。

表8 砖木结构房屋震害预测结果

Table 8 Earthquake damage prediction results of rural brick structural buildings

建筑物类型	项目	地震烈度		
		VII	VIII	IX
结构5	震害指数	0.4	0.6	0.8
	震害等级	中等破坏	严重破坏	倒塌

### (3) 土木结构房屋

土木结构房屋震害预测结果如表9所示,由表9可知,土木结构房屋抗震性能最差,在历次地震破坏中,震害等级最高,破坏程度最严重。地震烈度为VII度时,房屋表现为严重破坏,土坯墙多处开裂,屋顶出现大面积梭瓦现象,房屋定为危房,不宜居住;地震烈度为VIII、IX度时,房屋表现为倒塌,山墙开裂严重,纵横墙体出现贯通裂缝,土坯墙体局部或整体倒塌,木屋架破坏严重,瓦片发生大面积滑落,屋顶多处塌陷。



表 9 土木结构房屋震害预测结果

Table 9 Earthquake damage prediction results of rural civil structural buildings

建筑物类型	项目	地震烈度		
		VII	VIII	IX
结构6	震害指数	0.6	0.8	0.9
	震害等级	严重破坏	倒塌	倒塌

### 4.3 砖混结构房屋震害预测结果对比

为验证本文砖混结构房屋震害预测结果，引入西北地区农村砖混结构房屋震害预测结果（钟秀梅等，2019），进行了对比分析，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，西北地区与青海省共和地区砖混结构房屋震害预测结果基本一致。其中，结构 2 震害预测结果介于西北地区新建砖混结构与老旧砖混结构结果之间，波动幅度较小；相对于西北地区新建砖混结构，结构 1 在不同地震烈度下的破坏性较大，可能是因为结构 1 房屋楼层较高，且青海地区因经济条件、地理位置等影响，农村民居多为自建房屋，施工质量较差，导致房屋整体抗震性能较差；结构 3 和结构 4 为未设防的砖混结构，在不同地震烈度下整体表现为较高的震害指数。

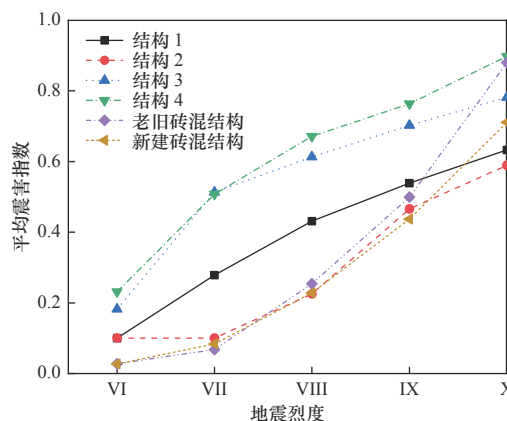


图 5 砖混结构房屋震害指数曲线

Fig. 5 Earthquake damage index curve of brick-concrete structure

## 5 结论

本文通过对青海省共和地区大量村落房屋的实地调查，给出区域内典型民居结构特征，统计分析青海省 1990 年以来中强地震农村民居震害调查数据，得到农村民居历史地震震害特征，并对传统民居庄廓院抗震能力现状进行预测，得出以下结论：

(1) 青海省共和地区农村民居结构类型主要以砖混结构（约占 48%）和砖木结构（约占 47%）为主，有少量（约占 5%）的土木结构。该地区多为自建房屋，仅部分农村民居按照标准设防等级建造，其抗震性能较差；砖木结构房屋圈梁、构造柱等抗震措施仍未得到广泛应用，基础设施、建造质量等问题在不同地区存在较大差异。

(2) 青海省共和地区农村民居中约 68% 砖混结构房屋未按照标准设防建造，抗震性能一般，但部分近年来改扩建的砖混结构房屋抗震性能较好，砖木结构和土木结构房屋抗震性能较差。采用楼层平均抗剪强度法和模糊综合评价法分别对砖混结构和砖（土）木结构房屋进行震害预测分析，得到了区域内各类典型农村民居 VI~X 度震害预测结果。地震烈度为 VI 度时，区内各类房屋多数表现为基本完好，仅少数抗震性能较差的土木结构房屋表现为轻微破坏，墙体出现裂缝；地震烈度为 VII 度时，砖混结构房屋表现为基本完好，未设防房屋发生中等破坏，砖木结构和土木结构房屋整体表现为中等破坏，砖墙局部产生裂缝，土坯墙体裂缝扩展延伸，木架屋顶出现梭瓦，承重构件基本完好，抗震性能基本达到设防要求；地震烈度为 VIII~IX 度时，砖混结构房屋主要表现为中等~严重破坏，墙体开裂，柱有水平通缝，房屋需修复后继续使用，砖木结构房屋表现为严重破坏，局部房屋发生倒塌，抗震性能较差的夯土墙发生倒塌，多数墙体大面积开裂，形成通缝；地震烈度为 X 度时，砖混结构房屋表现为严重破坏~毁坏，房屋无法修复，砖木结构和土木结构房屋普遍倒塌。

(3) 需合理高效推进青海省共和地区农村民居危旧房屋改造工程，青海农村地区多数为自建房，受施工工艺、经济条件约束，修建单层民房时设置抗震设防措施（地梁、圈梁和构造柱）、使用烧结普通砖砌块和强度等级较高的砂浆砌筑，均能提高自建房抗震性能。

## 参考文献

- 白国良, 薛冯, 徐亚洲, 2011. 青海玉树地震村镇建筑震害分析及减灾措施. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), **43**(3): 309—315.
- Bai G. L., Xue F., Xu Y. Z., 2011. Seismic damage analysis and reduction measures of buildings in village and town in the Yushu Earthquake. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, **43**(3): 309—315. (in Chinese)
- 崔文河, 2015. 青海多民族地区乡土民居更新适宜性设计模式研究. 西安: 西安建筑科技大学.
- Cui W. H., 2015. Appropriate design pattern of the vernacular dwellings renewal of multi-ethnic areas in Qinghai. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. (in Chinese)
- 杜晓霞, 2016. 村镇砖砌体房屋平面外抗震能力研究. 北京: 北京工业大学.
- Du X. X., 2016. Research on out-of-plane seismic capacity of brick masonry buildings in rural areas. Beijing: Beijing University of Technology. (in Chinese)
- 郭宁, 2012. 南北地震带具有区域特殊性的典型房屋建筑抗震性能分析. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Guo N., 2012. The seismic capability analysis of typical building with regional and characteristics in North-South seismic belt. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 郭小东, 王志涛, 段春辉, 2011. 村镇木构建筑震害预测方法. *建筑科学*, **27**(S2): 64—67.
- Guo X. D., Wang Z. T., Duan C. H., 2011. Earthquake damage assessment method for rural timber buildings. *Building Science*, **27**(S2): 64—67. (in Chinese)
- 刘志刚, 张守谊, 宋西战等, 1990. 青海省共和-兴海地震震害调查报告. *工程抗震*, (3): 45—49.
- 朴永军, 2013. 云南省青海省房屋地震易损性研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Piao Y. J., 2013. Study on housing seismic vulnerability of Yunnan and Qinghai province. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 秦松涛, 李智敏, 谭明等, 2010. 青海玉树 7.1 级地震震害特点分析及启示. *灾害学*, **25**(3): 65—70.
- Qin S. T., Li Z. M., Tan M., et al, 2010. Analysis of damage characteristics of the M 7.1 Yushu earthquake of Qinghai and the enlightenments. *Journal of Catastrophology*, **25**(3): 65—70. (in Chinese)
- 邱舒睿, 高惠瑛, 2015. 青海省农居地震灾害易损性研究. *震灾防御技术*, **10**(4): 969—978.
- Qiu S. R., Gao H. Y., 2015. The research of rural dwelling's seismic vulnerability in Qinghai. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **10**(4): 969—978. (in Chinese)
- 邵峰, 2017. 江西地震重点监视防御区内村镇房屋抗震能力调查与分析. 南昌: 南昌大学.
- Shao F., 2017. Investigation and analysis of rural houses in Jiangxi earthquake monitoring area. Nanchang: Nanchang University. (in Chinese)
- 苏延芬, 王铭勇, 2013. 青海农村民居抗震性能调查与分析. *建筑科学*, **29**(9): 13—16.
- Su Y. F., Wang M. Y., 2013. Investigation and analysis on seismic performance of rural houses in Qinghai. *Building Science*, **29**(9): 13—16. (in Chinese)
- 唐月, 李玉荣, 蔡康锋, 2012. 关于砖混结构震害预测方法的探讨. *混凝土与水泥制品*, (2): 57—60.
- Tang Y., Li Y. R., Cai K. F., 2012. Discussion on methods for seismic damage prediction in brick-and-concrete composite construction. *China Concrete and Cement Products*, (2): 57—60. (in Chinese)
- 王强, 2009. 砖木结构房屋抗震性能评价方法研究. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- Wang Q., 2009. The methodological analysis on the assessment of the anti-seismic performance of the brick-wood building. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese)
- 王强, 王兰民, 袁中夏等, 2011. 基于模糊数学的农村砖木房震害预测研究. *西北地震学报*, **33**(3): 279—283.
- Wang Q., Wang L. M., Yuan Z. X., et al, 2011. Study on earthquake damage prediction of the rural brick-wood building based on fuzzy mathematics. *Northwestern Seismological Journal*, **33**(3): 279—283. (in Chinese)
- 杨娜, 王龙, 刘爱文等, 2018. 青海东南部农村民居结构特点及抗震能力分析. *震灾防御技术*, **13**(1): 206—214.
- Yang N., Wang L., Liu A. W., et al, 2018. Structural characteristics and seismic capacity analysis of rural buildings in the southeast of Qinghai province. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **13**(1): 206—214. (in Chinese)

- 尹之潜, 李树桢, 杨淑文等, 1990. 震害与地震损失的估计方法. 地震工程与工程振动, **10** (1): 99—108.
- Yin Z. Q., Li S. Z., Yang S. W., et al, 1990. Estimating method of seismic damage and seismic loss. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, **10**(1): 99—108. (in Chinese)
- 尹之潜, 1996. 结构易损性分类和未来地震灾害估计. 中国地震, **12** (1): 49—55.
- Yin Z. Q., 1996. Classification of structure vulnerability and evaluating earthquake damage from future earthquake. Earthquake Research in China, **12**(1): 49—55. (in Chinese)
- 中国地震局监测预报司, 1996. 中国大陆地震灾害损失评估汇编: 1990—1995. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局监测预报司, 2001. 中国大陆地震灾害损失评估汇编: 1996—2000. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局监测预报司, 2010. 2001—2005 年中国大陆地震灾害损失评估报告汇编. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司, 2015. 2006—2010 年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京: 地震出版社.
- 钟秀梅, 袁中夏, 常想德等, 2019. 西北地区农村房屋结构细化分类及抗震性能分析. 地震研究, **42** (2): 151—157.
- Zhong X. M., Yuan Z. X., Chang X. D., et al, 2019. Structure refinement and seismic performance analysis of rural houses in northwest China. *Journal of Seismological Research*, **42**(2): 151—157. (in Chinese)
- 左丹, 2015. 青海乡村传统民居院落景观的设计研究. 西宁: 青海大学.
- Zuo D., 2015. The study of the courtyard landscape design of Qinghai rural tradition residence. Xining: Qinghai University. (in Chinese)