

李述涛,刘晶波,宝鑫,等.基于自由场局部变形的地下结构抗震 Pushover 分析方法[J].地震工程学报,2019,41(6):1472-1481.  
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1472

LI Shutao, LIU Jingbo, BAO Xin, et al. Seismic Analysis of Underground Structures Based on Local Deformation of the Free Field via the Pushover Analysis Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1472-1481. doi: 10.3969/j.issn. 1000-0844.2018.06.1472

## 基于自由场局部变形的地下结构抗震 Pushover 分析方法

李述涛, 刘晶波, 宝鑫, 王菲, 王东洋

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要:**对地下结构抗震 Pushover 分析方法进行了改进,采用自由场局部变形峰值作为目标位移,局部变形峰值时刻对应的土层水平加速度作为等效惯性加速度输入。给出了局部变形峰值和等效惯性加速度确定方式,详细介绍了基于自由场局部变形的地下结构抗震 Pushover 分析方法实施步骤、使用方法和功能特点。该方法更有针对性地考虑了强地震作用下不同埋深地下结构与土体的非线性特征以及两者之间的相互作用,通过分析变形和受力情况可以得到完整的能力曲线,更好地评估地下结构抗震性能。使用本文方法对 3 种埋深的地下结构进行计算,并与动力非线性分析结果进行对比研究。结果表明:本方法在计算稳定性和模拟精度方面优于基于自由场整体变形的 Pushover 方法;对于不同的输入地震波,能力曲线的吻合程度更高;在强震和罕遇地震情况下,对于深埋地下结构,计算结果略大于动力非线性结果,对实际工程而言更加安全。

**关键词:**地下结构; Pushover 分析方法; 抗震分析; 土-结构相互作用; 动力非线性分析

**中图分类号:** TU311; P315.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2019)06-1472-10

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1472

## Seismic Analysis of Underground Structures Based on Local Deformation of the Free Field via the Pushover Analysis Method

LI Shutao, LIU Jingbo, BAO Xin, WANG Fei, WANG Dongyang

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The seismic pushover analysis method of underground structures is improved by applying the local deformation peak of the free field is used as the target displacement and the corresponding horizontal acceleration of the soil layer is used as the equivalent inertial acceleration input. The local peak deformation and method of determining the equivalent inertial acceleration are given, and the implementation steps, application, and functional characteristics of the seismic pushover analysis method for underground structures based on local deformation of the free field are introduced in detail. Compared with the pushover method, the proposed method considers the nonlinear characteristics of different buried underground structures and interactions between the

**收稿日期:** 2017-08-20

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51478247)

**第一作者简介:** 李述涛(1984-),男,博士生,工程师,主要从事地下结构抗震研究。E-mail: list16@mails.tsinghua.edu.cn.

soil and the structure. A complete ability curve can be obtained by analyzing the deformation and stress conditions to better evaluate the seismic performance of the underground structure. For validation, the proposed method and finite element dynamic analysis are performed to analyze three practical subway station structures. Results show that the proposed method is superior to the pushover method based on integral deformation of the free field in terms of stability and simulation accuracy and more consistent with the different input seismic waves. In the case of strong earthquakes, the calculation results are slightly larger than the dynamic nonlinear analysis results for deep buried underground structures.

**Keywords:** underground structure; Pushover analysis method; seismic analysis; soil-structure interaction; dynamic nonlinear analysis

## 0 引言

目前常用的地下结构抗震弹塑性分析方法包括动力时程分析法和拟静力实用分析方法等。目前发展的地下结构 Pushover 分析方法属于后者。其采用 3 种等效惯性加速度分布形式对土-结构静力模型进行加载,使用自由场反应中地面与基岩间的峰值相对位移(整体 PGRD)作为目标位移,通过计算获得地下结构完整的能力曲线,从而评估结构抗震能力<sup>[1-2]</sup>。这种方法操作简单,精度较高,近年来已得到广泛应用。

整体 PGRD 作为反映地震作用强度的指标,将结构的地震反应状态与地震作用强度有效联系起来。但此方法无法精确反映地震作用和土层地震反应的局部特征,影响计算精度。随着城市地下结构的埋深范围越来越大,浅埋和深埋地下结构在相同地震作用下表现出不同的反应特性,不适合继续采用整体 PGRD 作为目标位移。本文提出了以自由场局部变形峰值(局部 PGRD)作为目标位移的 Pushover 分析方法。以北京地铁 5 号线崇文门站为背景进行了计算分析,将计算结果与动力非线性计算结果进行了对比,结果表明本文方法具有更好的精度与可靠性,适用于深埋地下结构的地震反应计算。

## 1 基于自由场局部变形的 Pushover 分析方法

### 1.1 自由场局部变形峰值的确定

自由场局部变形峰值(局部 PGRD)定义为自由场反应中地下结构顶板和底板对应土层之间的水平相对位移峰值,可由一维自由场土层地震反应分析获得<sup>[3-5]</sup>。为实现以局部 PGRD 作为目标位移,需要建立带有附加自由场的土-结构相互作用分析模型。即在同一计算分析中同时建立土-结构有限元模型与相应的柱状土自由场模型(附加自由场模

型),两者相互独立,但同时施加分布形式相同的水平惯性加速度。

对比地面与基岩间的峰值相对位移,不同埋深的地下结构对应的局部 PGRD 均不相同。采用局部 PGRD 作为地下结构抗震分析及设计使用的地震动参数能够更好的反应不同埋深的地下结构在水平荷载作用下的变形和受力特点,获得更准确的能力曲线,更有针对性地评估不同埋深地下结构的抗震性能。

### 1.2 水平惯性加速度分布形式

原 Pushover 方法采用整体 PGRD 对应时刻的加速度对土层和地下结构按照其所在的位置进行单调递增加载<sup>[2,6]</sup>。本文在确定以局部 PGRD 作为目标位移的基础上,采用自由场局部变形峰值时刻的水平加速度分布作为等效惯性加速度输入。这样,对应不同输入地震波和不同埋深地下结构,均可以找到与之对应的水平等效惯性加速度分布形式。

### 1.3 方法实施步骤

(1) 确定自由场局部变形峰值(局部 PGRD)和水平等效惯性加速度分布形式。对自由场模型进行输入地震波作用下的一维土层地震反应分析,获得与结构顶板和底板对应自由场两土层相对位移的最大值(绝对值)和对应时刻。该时刻各土层水平加速度即为需要输入的等效惯性加速度分布形式。

(2) 确定分析模型的边界条件。建立柱状土自由场模型,底面采用固定边界,侧面节点固定水平向位移,计算在自重作用下的反应,读取自由场模型侧面节点竖向位移与水平支座反力并存储,作为下一步土-结构分析模型的边界条件。

(3) 建立分析模型。建立带有附加自由场(柱状土)的土-结构相互作用分析模型,模型的底面均采用固定边界;将第(2)步中求得的竖向位移与水平支座反力分别施加于附加自由场模型与土-结构模

型的相应侧面节点上。

(4) 求解自重作用下的反应。计算附加自由场模型与土-结构模型在自重作用下的静力反应。

(5) Pushover 分析。在附加自由场与土-结构模型中的土体单元和结构单元上按照所在深度位置施加第(1)步中得到的水平惯性加速度,按比例进行单调递增加载,直至附加自由场模型的反应达到第(1)步中求得的局部变形峰值。记录每一步增量完成后土与结构的非线性反应数据,可以得到结构内力与自由场局部变形的关系等,继续加载至结构破

坏,可获得完整的能力曲线并评价结构的抗震能力。

## 2 改进的方法验证

### 2.1 计算模型及参数

图 1(a)为北京地铁 5 号线崇文门站标准断面,其中中柱直径为 1 m,控制截面  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  位置示于图中。有限元分析模型如图 1(b)所示,左侧为附加自由场模型,右侧为土-结构相互作用分析模型;模型的上下分别为地表面与基岩顶面,模型厚度按照结构柱纵向间距取为 6 m。地基土的物理性质见表 1 所列。

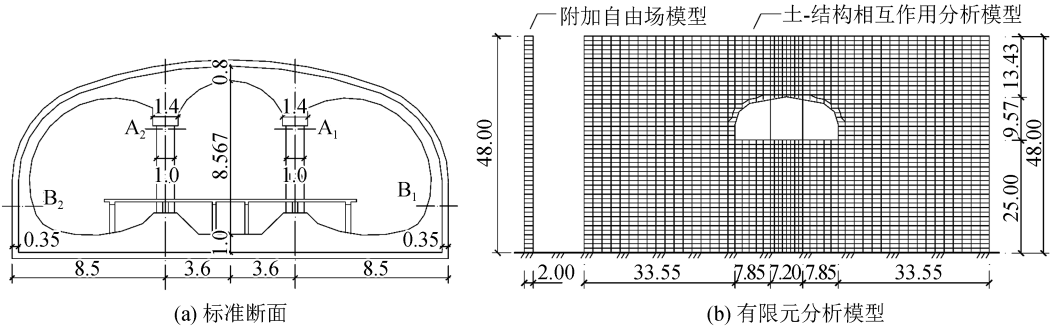


图 1 崇文门站标准断面和带有附加自由场的土-结构相互作用分析模型(单位:m)

Fig.1 Standard cross section of the Chongwenmen subway station and the soil-structure interaction model with additional free field (Unit:m)

表 1 土层物理性质

Table 1 Physical properties of soil layers

| 土层 | 深度 /m | 密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 剪切波速 /( $m \cdot s^{-1}$ ) | 泊松比 |
|----|-------|---------------------------|----------------------------|-----|
| 1  | 0~3   | 2.0                       | 152                        | 0.3 |
| 2  | 3~7   | 2.0                       | 170                        | 0.3 |
| 3  | 7~16  | 2.0                       | 258                        | 0.3 |
| 4  | 16~22 | 2.0                       | 300                        | 0.3 |
| 5  | 22~26 | 2.0                       | 320                        | 0.3 |
| 6  | 26~29 | 2.0                       | 400                        | 0.3 |
| 7  | 29~31 | 2.0                       | 350                        | 0.3 |
| 8  | 31~39 | 2.0                       | 420                        | 0.3 |
| 9  | 39~48 | 2.0                       | 400                        | 0.3 |
| 10 | >48   | 2.0                       | 550                        | 0.3 |

为模拟钢筋混凝土构件的非线性特性,采用清华大学土木工程系在 MSC.Marc 软件基础上开发的钢筋混凝土纤维模型程序 THUFIBER<sup>[7]</sup>。材料参数取为混凝土弹性模量  $E_0 = 30 \text{ GPa}$ ,峰值抗压强度  $f_c = 30 \text{ MPa}$ ,峰值压应变  $\epsilon_0 = 0.002$ ,极限抗压强度  $f_u = 26 \text{ MPa}$ ,极限压应变  $\epsilon_u = 0.004$ ;钢筋弹性模量  $E_s = 200 \text{ GPa}$ ,屈服强度  $f_y = 400 \text{ MPa}$ 。为模拟地基土在重力以及地震作用下的非线性特性,采用服从各向同性硬化规律的弹塑性模型,屈服准则采用抛物线型莫尔-库仑准则。

### 2.2 不同水平加速度分布形式的影响

输入地震波采用 El Centro 波、Loma Prieta 波

和 Kobe 波( $PGA = 0.4g$ )。按上节给出的方法,得到局部变形峰值时刻水平等效惯性加速度分布形式,如图 2 所示,图中实线为倒三角形水平惯性加速度分布。

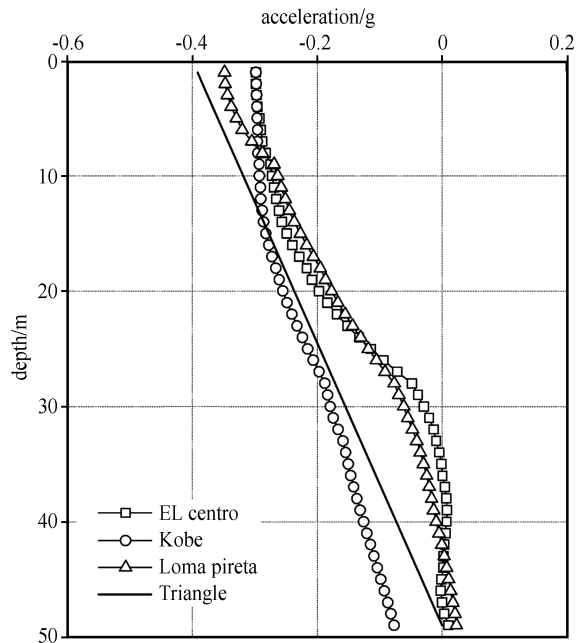


图 2 埋深 13 m 地下结构水平惯性加速度分布形式

Fig.2 Horizontal acceleration distribution of the underground structure at a depth of 13 m

图 3 给出了 Pushover 分析中结构控制截面  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  处弯矩与附加自由场模型中对应土层间相对位移的关系。其中,空心符号和实线分别表示局部 PGRD 对应时刻的水平惯性加速度分布

形式和倒三角形分布形式计算得到的结果。由图可知,结构能力曲线与地震波选取关系不大,避免了动力分析中地震波选取不同而使计算结果相差较大的情况。另外,倒三角形分布计算结果与实际加速度

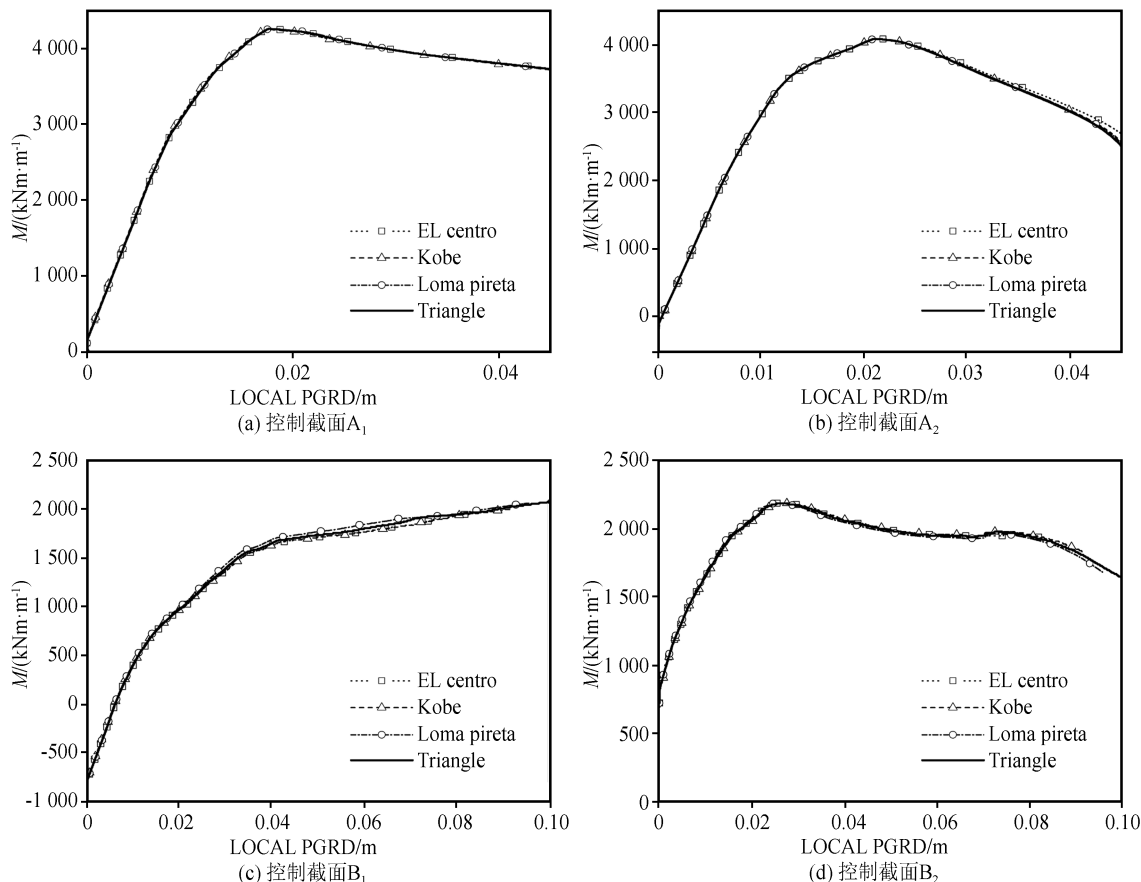


图 3 埋深 13 m 地下结构控制截面能力曲线

Fig.3 Capacity curves of control sections of the underground structure at a depth of 13 m

计算结果吻合良好。由于其不需对土层进行地震一维反应分析,可考虑在 Pushover 分析时使用倒三角形加速度分布形式。

### 2.3 与动力非线性分析方法的对比

为研究本文方法的计算精度和可靠性,采用动力时程分析方法计算自由场模型和土-结构模型在输入地震波作用下的反应。采用粘弹性人工边界和波动输入方法<sup>[2,8-10]</sup>。通过对自由场的计算获得局部 PGRD 值和对应时刻;通过对土-结构模型计算获得该时刻对应的控制截面弯矩值。 $PGA$  分别取  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.8g$  和  $1.0g$  进行计算,其中  $0.8g$  和  $1.0g$  两种情况在现实中的发生概率非常小,本文是为验证 Pushover 分析方法在弹塑性阶段的计算精度而选取。 $A_1$ 、 $B_2$  两处控制截面弯矩值相对较大,可能较早进入屈服状态,下面对这两个控制截面

进行分析比较。

图 4 给出了基于局部 PGRD 的 Pushover 方法计算结果和动力非线性计算结果的对比。曲线为 2.2 节求得的控制截面能力曲线,离散空心符号为动力非线性计算结果,横坐标为自由场局部土层间相对位移,纵坐标为自由场局部 PGRD 时刻土-结构模型的结构控制截面弯矩值。基于局部 PGRD 的 Pushover 分析方法计算结果与动力时程分析方法计算结果符合良好,特别是在  $PGA$  取  $0.8g$  和  $1.0g$  的情况下,也能保持较高精度。

### 2.4 与基于整体 PGRD 的 Pushover 分析结果对比

文献[6]给出了 13 m 埋深地下结构控制截面弯矩随自由场基岩和顶部土层相对位移的变化曲线(图 5),以及与动力非线性分析结果的对比(图 6)。

对比基于局部 PGRD 和整体 PGRD 的计算结

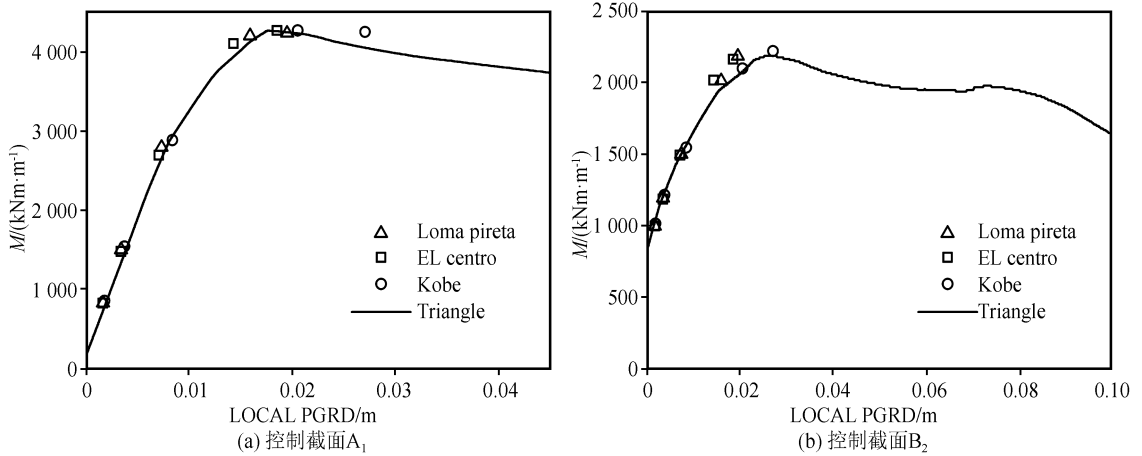


图4 基于局部 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结果对比(埋深 13 m)

Fig.4 Comparison between the Pushover analysis results (based on local PGRD) and nonlinear dynamic analysis results (at a depth of 13 m)

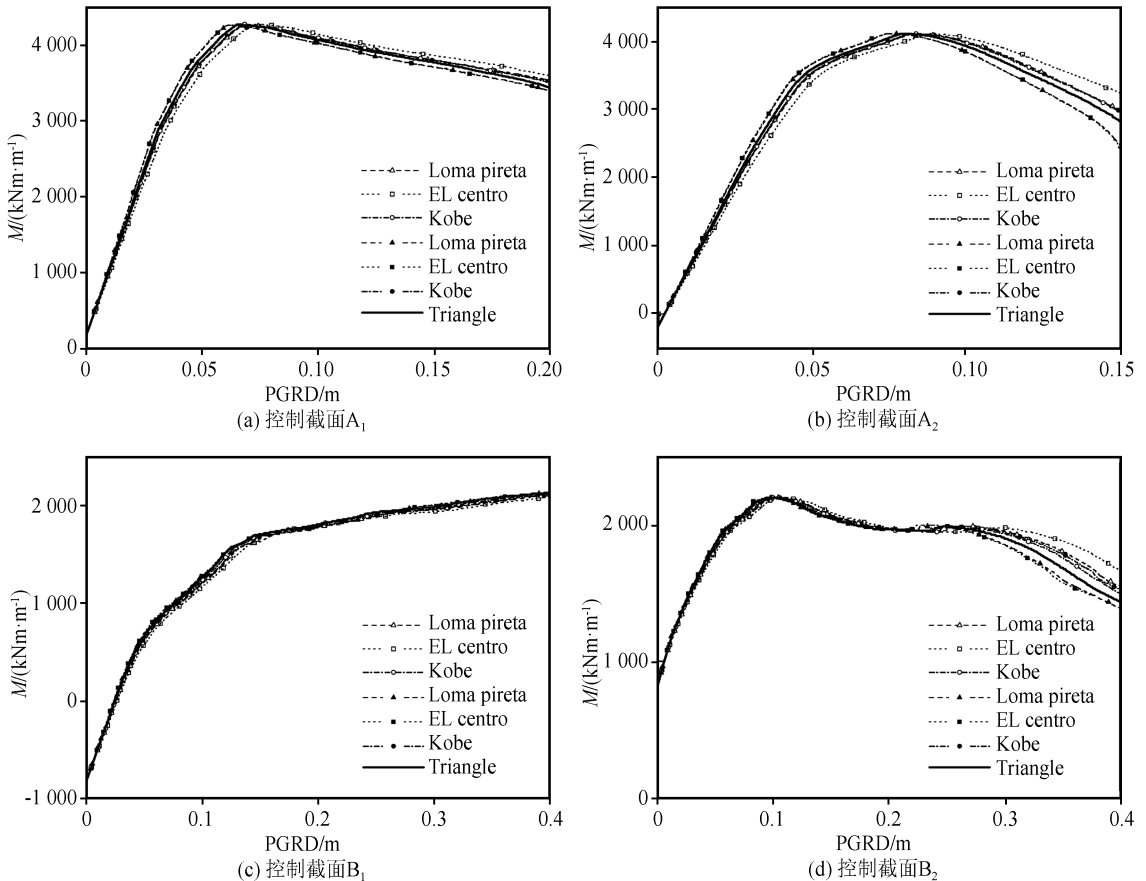


图5 埋深 13 m 地下结构控制截面能力曲线(整体 PGRD)

Fig.5 Capacity curves of control sections of the underground structure at a depth of 13 m (based on general PGRD)

果,得到以下两点结论:

(1) 在不同地震波作用下,基于局部 PGRD 的 Pushover 方法得出的能力曲线吻合程度要高于基于整体 PGRD 的分析结果。这说明在计算多种地震波输入的情况下,基于局部 PGRD 的分析方法适用性更强。

(2) 与动力非线性分析结果的吻合度方面,局部 PGRD 的分析结果要略优于整体 PGRD 分析结果,特别是在  $PGA$  取  $0.4g$ 、 $0.8g$  和  $1.0g$  的情况下。这一点充分说明改进后的 Pushover 方法不仅有较好的可靠性与模拟精度,而且与原方法相比在中大震和罕遇地震的情况下计算精度有所提高。

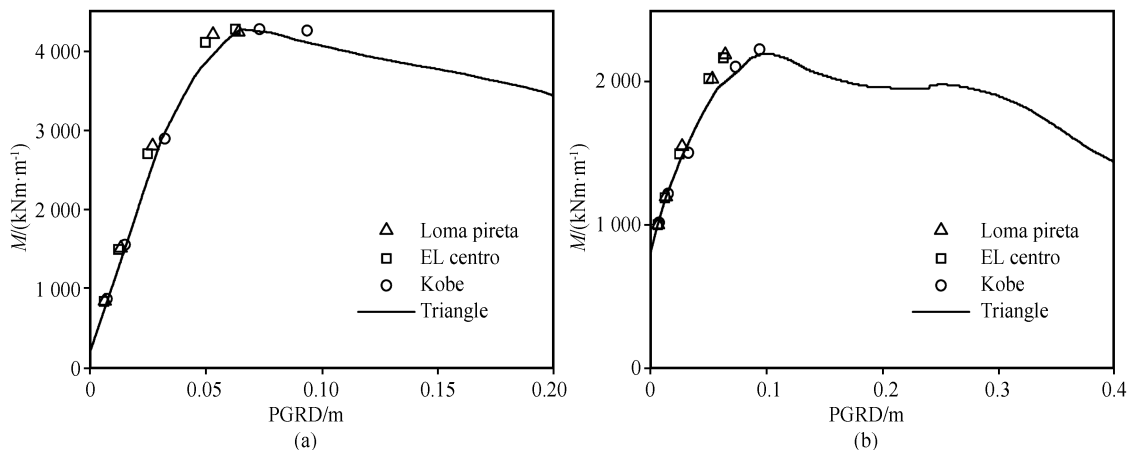


图 6 基于整体 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结果对比(埋深 13 m)

Fig.6 Comparison between the Pushover analysis results (based on general PGRD) and nonlinear dynamic analysis results (at a depth of 13 m)

### 3 不同埋深地下结构的计算结果分析

#### 3.1 结构顶板埋深 4 m 的计算结果

图 7 为 3 种地震波作用下 ( $PGA = 0.4g$ ), 埋深 4 m 地下结构局部 PGRD 时刻水平惯性加速度分布形式。

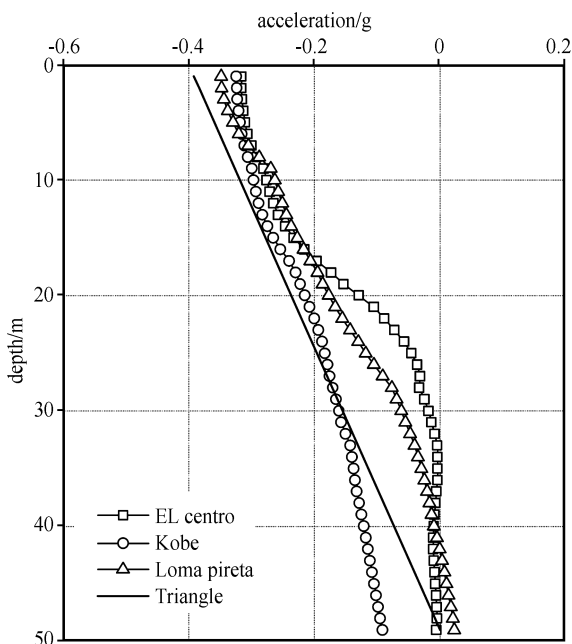


图 7 埋深 4 m 地下结构水平惯性加速度分布形式

Fig.7 Horizontal acceleration distribution of the underground structure at a depth of 4 m

图 8 给出了出了 Pushover 分析结果中弯矩值较大的两个控制截面  $A_2$  和  $B_2$  处弯矩与附加自由场模型中对应土层间相对位移关系。图 9 给出了 Pushover 分析结果与动力非线性计算结果对比。

$PGA$  分别取  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.8g$  和  $1.1g$ 。基于局部 PGRD 的 Pushover 方法分析结果与动力非线性计算结果在大部分情况下符合较好。在罕遇地震情况下,左侧墙角下  $B_2$  出现一定误差,Pushover 计算结果小于动力分析结果。

文献[11]给出了 4 m 埋深情况下基于整体 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结果的对比(图 10)。在不同地震波作用下,基于局部 PGRD 的分析结果能力曲线吻合度要高于整体 PGRD 结果;在与动力非线性分析结果吻合度方面,前者也要优于后者,特别是在  $PGA$  取  $0.4g$ 、 $0.8g$  和  $1.0g$  的情况下。本节计算结果验证了上一章的结论。

#### 3.2 结构顶板埋深 31 m 的计算结果

图 11 为 3 种地震波作用下 ( $PGA = 0.4g$ ), 埋深 31 m 地下结构局部 PGRD 时刻水平惯性加速度分布形式。

图 12 给出了 Pushover 分析结果中弯矩值较大的两个控制截面  $A_1$  和  $B_2$  处弯矩与附加自由场模型对应土层相对位移之间的关系。图 13 给出了 Pushover 方法分析结果与动力非线性计算结果对比。对于控制截面  $A_1$ ,在  $PGA$  为  $0.8g$  的情况下存在一定误差,但 Pushover 结果较动力非线性计算结果偏大,对于实际工程而言更加安全;对于控制截面  $B_2$ ,Pushover 方法计算结果与动力非线性计算结果基本一致。另外,深埋的地下结构由于柱等压弯构件所受轴压力较大,因此其弯矩极限承载力较其浅埋深的情况要小。

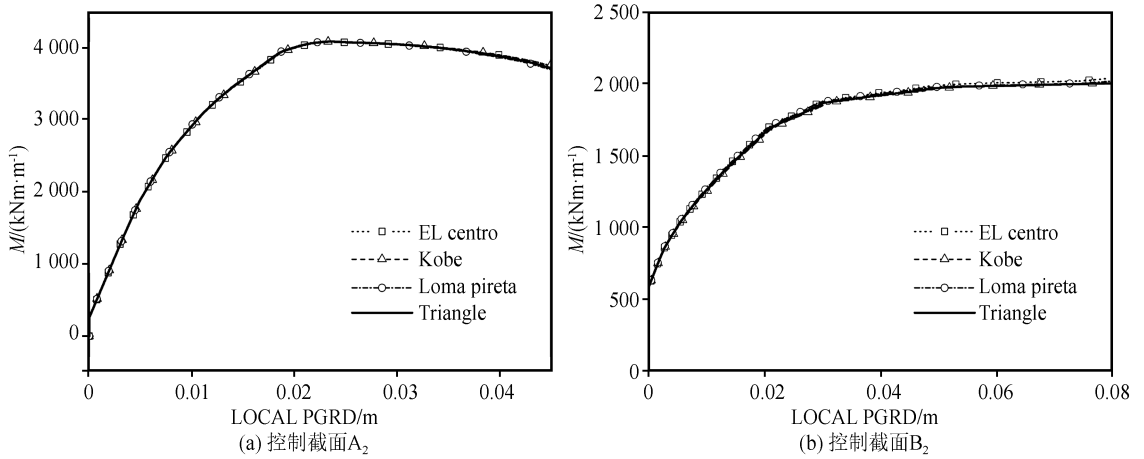


图8 埋深4 m 地下结构控制截面能力曲线

Fig.8 Capacity curves of control sections of the underground structure at a depth of 4 m

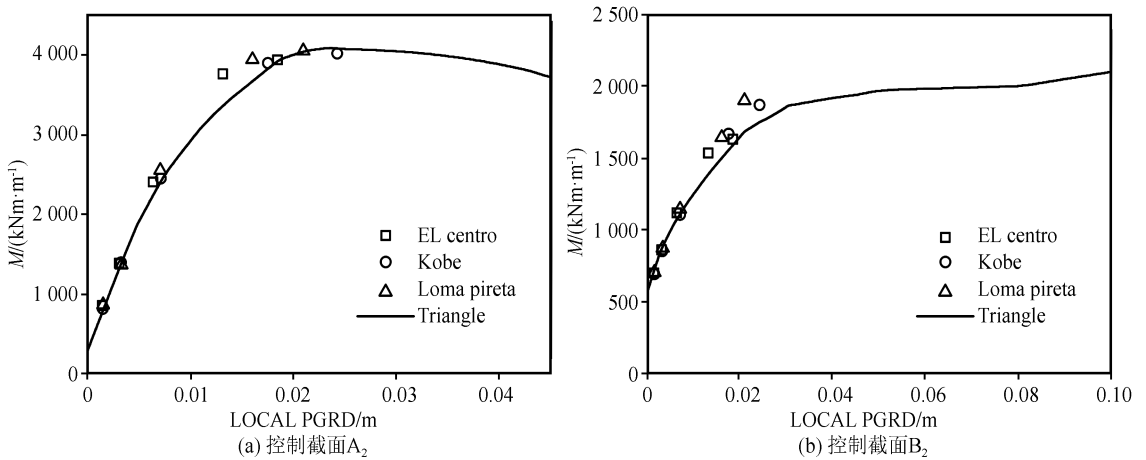


图9 基于局部 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结果的对比(埋深 4 m)

Fig.9 Comparison between the Pushover analysis results (based on local PGRD) and nonlinear dynamic analysis results (at a depth of 4 m)

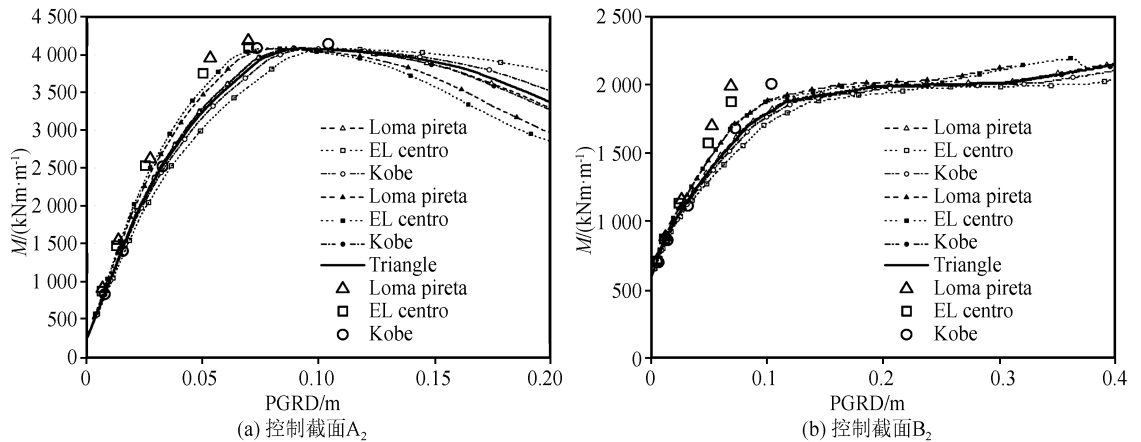


图10 基于整体 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结果的对比(埋深 4 m)

Fig.10 Comparison between the Pushover analysis results (based on general PGRD) and nonlinear dynamic analysis results (at a depth of 4 m)

文献[11]给出了 31 m 埋深情况下基于整体 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结

果对比(图 14)。控制截面 A<sub>1</sub> 的计算结果两者相似;对于控制截面 B<sub>2</sub>,在 PGA 取 0.4g 和 0.6g 的情

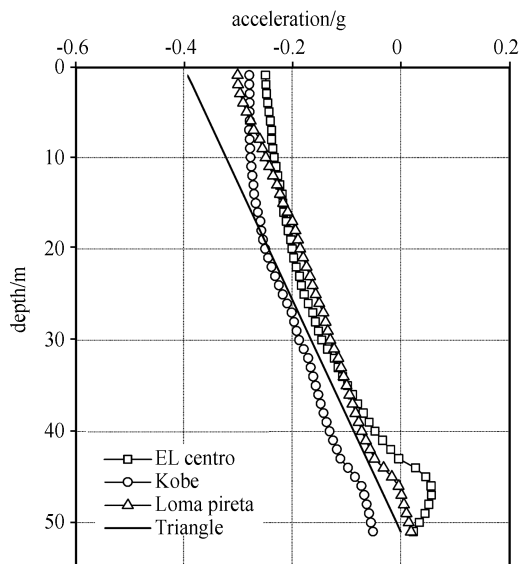


图 11 埋深 31 m 地下结构的水平惯性加速度分布形式

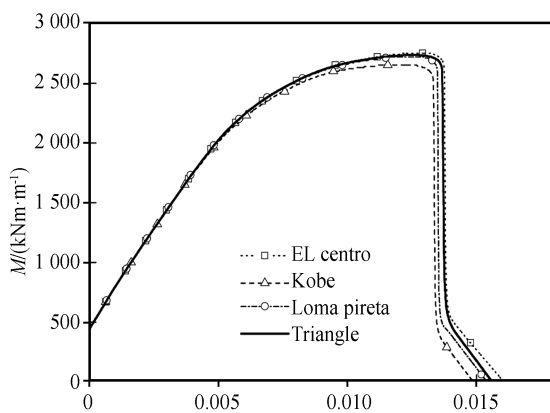
Fig.11 Horizontal acceleration distribution of the underground structure at a depth of 31 m

况下,局部 PGRD 计算结果要优于整体 PGRD 计算结果。这说明对于深埋结构,本文方法同样提高了 Pushover 方法的计算精度。

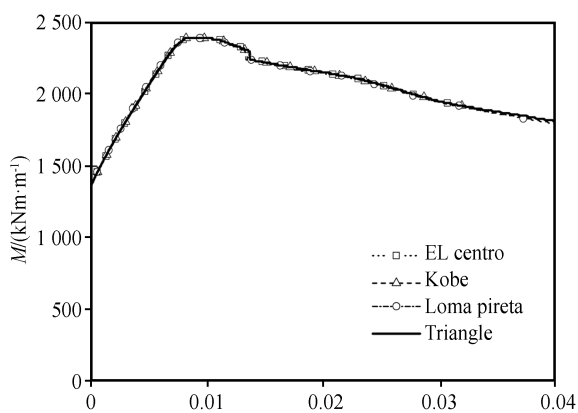
#### 4 结论

本文采用局部 PDRD 作为目标位移,使用与之对应时刻的水平等效惯性加速度分布形式,对地下结构模型进行了计算分析,得到以下几点结论:

(1) 对于不同埋深的地下结构,在轻微和中等强度地震情况下,基于局部 PGRD 的 Pushover 方法计算结果与动力时程计算结果均吻合良好。在罕遇地震情况下( $PGA$  取  $1.0g$  以上),存在一定误差。对于浅埋结构,Pushover 计算结果小于动力时程结果;对于中等埋深和深埋结构,Pushover 计算结果略大于动力时程结果。因此对于实际工程而言,中等埋深和深埋结构采用基于局部 PGRD 的 Pushover 方法进行计算分析、评估结构抗震性能时,



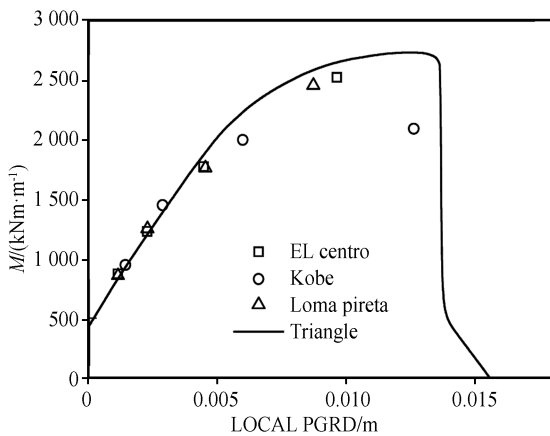
(a) 控制截面A<sub>1</sub>



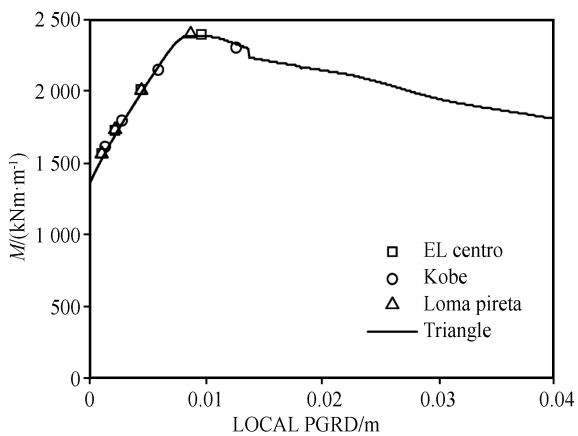
(b) 控制截面B<sub>2</sub>

图 12 埋深 31 m 地下结构控制截面能力曲线

Fig.12 Capacity curves of control sections of the underground structure at a depth of 31 m



(a) 控制截面A<sub>1</sub>



(b) 控制截面B<sub>2</sub>

图 13 基于局部 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结果的对比(埋深 31 m)

Fig.13 Comparison between the Pushover analysis results (based on local PGRD) and nonlinear dynamic analysis results (at a depth of 31 m)



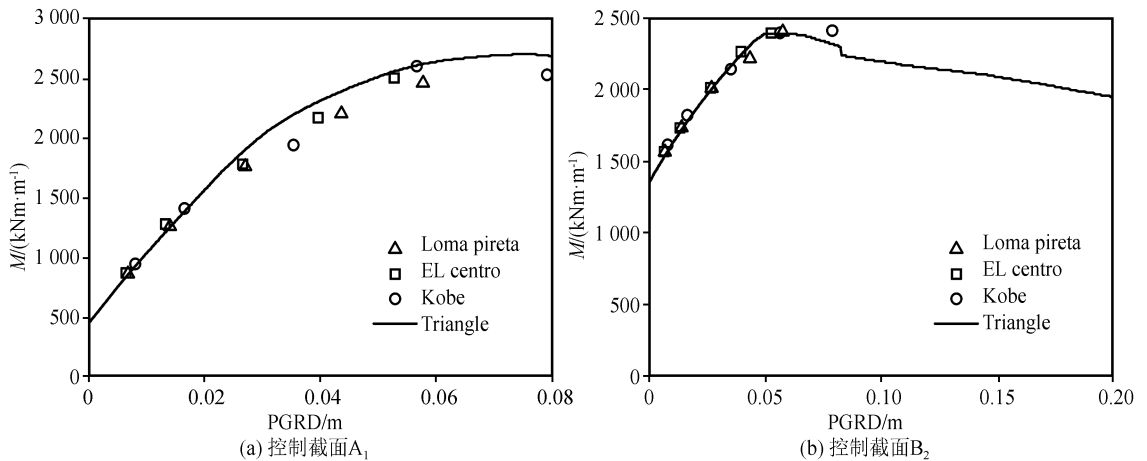


图 14 基于整体 PGRD 的 Pushover 分析结果与动力非线性分析结果的对比(埋深 31 m)

Fig.14 Comparison between the Pushover analysis results (based on general PGRD) and nonlinear dynamic analysis results (at a depth of 31 m)

结果是偏向安全的。

(2) 不论是浅埋还是深埋结构,基于局部 PGRD 的分析结果与动力非线性分析结果的吻合度都要高于基于整体 PGRD 的计算结果。这说明本文的 Pushover 分析方法在稳定性和模拟精度方面都有所提高。

(3) 对于不同地震波,局部 PGRD 的能力曲线较整体 PGRD 的能力曲线吻合程度更高,这说明在分析计算多种地震波输入的情况下,本文方法适用性更强。

(4) 在采用局部 PGRD 作为目标位移的情况下,倒三角形加速度分布形式的计算精度有很大提高,且在不同埋深的工况下,都与实际加速度计算结果保持很高的吻合度。由于倒三角形分布形式概念清晰,不需对土层进行地震一维反应分析,因此可考虑采用该分布形式进行地下结构抗震 Pushover 分析。

## 参考文献(References)

- [1] 刘晶波,李彬.地铁地下结构抗震分析及设计中的几个关键问题[J].土木工程学报,2006,39(6):106-110.  
LIU Jingbo, LI Bin. Issues on the Seismic Analysis and Design of Subway Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 106-110.
- [2] 李彬.地铁地下结构抗震理论分析与应用研究[D].北京:清华大学,2005.  
LI Bin. Theoretical Analysis of Seismic Response of Underground Subway Structures and Its Application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [3] IDRIS I M, SUN J I. SHAKE91: A Computer Program for

Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits User's Guide[R]. California: University of California, Davis, 1992.

- [4] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA: A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analysis of Layered Soil Deposits User's Manual[R]. Los Angeles: University of Southern California, 2000.
- [5] 李小军.非线性土层地震反应分析的一种方法[J].华南地震, 1992, 12(4): 1-8.  
LI Xiaojun. A Method for Analysing Seismic Response of Non-linear Soil Layers [J]. South China Journal of Seismology, 1992, 12(4): 1-8.
- [6] 刘晶波,刘祥庆,李彬.地下结构抗震分析与设计的 Pushover 分析方法[J].土木工程学报,2008,41(4):73-80.  
LIU Jingbo, LIU Xiangqing, LI Bin. A Pushover Analysis Method for Seismic Analysis and Design of Underground Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 73-80.
- [7] 陆新征,缪志伟,江见鲸,等.静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[J].山西地震,2006(2):7-11, 18.  
LU Xinzheng, MIAO Zhiwei, JIANG Jianjing, et al. Collapse Simulation of High-rise Structure of Concrete under the Action of Static and Dynamic Load [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2006(2): 7-11, 18.
- [8] 刘晶波,吕彦东.结构—地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J].土木工程学报,1998,31(3):55-64.  
LIU Jingbo, LÜ Yandong. A Direct Method for Analysis of Dynamic Soil—Structure Interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-64.
- [9] 刘晶波,李彬.三维黏弹性静—动力统一人工边界[J].中国科学(E辑),2005,35(9):966-980.  
LIU Jingbo, LI Bin. A Unified Viscous-spring Artificial Boundary for 3-D Static and Dynamic Applications [J]. Science in Chi-

na (Series E), 2005, 35(9): 966-980.

- [10] 李彬,刘晶波.粘弹性人工边界在 Marc 中的实现[C]//第十四届全国结构工程学术会议论文集第 I 册.烟台:工程力学杂志社,2005.

LI Bin, LIU Jingbo. Realization of Viscous-spring Artificial Boundary in Marc [C]//Proceedings of the 14th National Conference on Structural Engineering. Yantai: Engineering

Mechanics Press, 2005.

- [11] 刘晶波,刘祥庆,薛颖亮.地下结构抗震分析与设计的 Pushover 方法适用性研究[J].工程力学,2009,26(1):49-57.

LIU Jingbo, LIU Xiangqing, XUE Yingliang. Study on Applicability of the Pushover Method for Seismic Analysis and Design of Underground Structures [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 49-57.

\*\*\*\*\*  
(上接第 1395 页)

- [2] 郭增建,申秀荣,张惠芳.副高的地气耦合效应[J].高原地震,2000,12(3):23-26.

GUO Zengjian, SHEN Xiurong, ZHANG Huifang. Coupling Effect of the Earth-gas in Secondary High Barometric Pressure [J]. Plateau Earthquake Research, 2000, 12(3): 23-26.

- [3] 郭增建,秦保燕.灾害物理学[M].西安:陕西科学技术出版社,1989.

GUO Zengjian, QIN Baoyan. Disaster Physics [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1989.

- [4] 郭增建,秦保燕.地震成因和地震预报[M].北京:地震出版社,1991.

GUO Zengjian, QIN Baoyan. Earthquake Genesis and Earthquake Prediction [M]. Beijing: Earthquake Press, 1991.

- [5] 天气谚语编写组.天气谚语在长期天气预报中的应用[M].北

京:科学出版社,1977.

Group of Weather Proverbs. Application of Weather Proverbs in Long-term Weather Forecast [M]. Beijing: Science Press, 1977.

- [6] 郭增建.地震与沙漠化和沙尘暴[J].西北地震学报,2001,23(3):250-256.

GUO Zengjian. Earthquake and Desertation and Sand-dust Storm [J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(3): 250-256.

- [7] 郭安红,吴瑾冰,刘庚山.从地气耦合角度讨论沙漠的成因[J].自然灾害学报,2004,13(2):88-91.

GUO Anhong, WU Jiming, LIU Gengshan. Discussion on Desert Formation from Viewpoint of Coupling of the Earth and Atmosphere [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(2): 88-91.