

DOI: 10.11779/CJGE2020S1015

# 筑坝堆石料力学特性试验等效密度确定方法研究

卢一为, 程展林, 潘家军, 江泊洵, 徐 晗

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 由于室内试验设备尺寸的限制, 对筑坝堆石料开展室内试验研究时必须进行缩尺, 而堆石料的力学特性具有明显的缩尺效应, 因此如何通过缩尺后的试验结果反映原型级配堆石料的力学特性始终是工程界重点关注的问题之一。为研究此问题, 开展了一系列堆石料室内大型旁压模型试验和大型三轴试验, 提出了一种堆石料室内力学特性试验等效密度确定方法, 即通过室内旁压模型试验得到堆石料旁压模量与密度的关系, 然后与现场原型级配堆石料的旁压模量进行对比确定室内力学特性试验的等效密度。试验结果表明: 堆石料的旁压模量随密度的增大而增大; 当密度一定时, 不同级配的堆石料对应不同的旁压模量; 当旁压模量相等时, 不同级配堆石料的力学性质是相近的, 说明将旁压模量作为控制指标确定筑坝堆石料室内力学特性试验等效密度的方法是有效可行的。研究成果对解决堆石料的缩尺效应问题以及准确评估大坝安全问题提供了有力支撑。

**关键词:** 筑坝堆石料; 力学特性; 缩尺效应; 旁压试验; 等效密度

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0075-05

**作者简介:** 卢一为(1990—), 男, 博士, 工程师, 主要从事粗粒土的工程特性与软基加固等研究工作。E-mail: luyiweicn@163.com。

## Equivalent density determination method for dam rockfill materials in mechanical tests

LU Yi-wei, CHENG Zhan-lin, PAN Jia-jun, JIANG Ji-wei, XU Han

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Given the size limitation of laboratory test equipment, it is necessary to scale the rockfill in laboratory tests. The mechanical properties of rockfill have scale effect obviously, and how to obtain the mechanical properties of rockfill accurately through scaled tests is one of the key concerns in the engineering field. A series of large-scale pressuremeter tests and triaxial tests are conducted, and a method to obtain the equivalent density of rockfill in laboratory tests is proposed. The relationship between pressuremeter modulus and density can be established through the pressuremeter tests, then the equivalent density can be obtained by comparing the pressuremeter modulus in laboratory with that in field. The test results reveal that the pressuremeter modulus of rockfill increases with the density, and the pressuremeter modulus of rockfill varies with different gradations when the density is the same. The mechanical properties of rockfill with different gradations and densities are similar when the pressuremeter modulus is equal, which indicates that the proposed method is effective and feasible. The research results provide strong support for solving the scale effect problems of rockfill and accurate assessment of dam safety.

**Key words:** dam rockfill material; mechanical property; scale effect; pressuremeter test; equivalent density

## 0 引 言

随着水资源开发进程的深入推进, 我国高土石坝逐渐向 200 m 以上的特高土石坝方向发展。与 200 m 以下高土石坝相比, 特高土石坝的变形控制难度更大, 现有理论、方法、标准和技术水平无法完全满足新形势下特高土石坝建设和长期安全保障<sup>[1]</sup>。

准确了解筑坝堆石料的力学性质是保障高土石坝的设计安全和运营安全的前提条件。在实际土石坝填

筑中采用的堆石料最大粒径可达到 1000 mm<sup>[2]</sup>。与室内试验允许的最大粒径 60 mm 相差甚远, 直接对现场原型级配堆石料开展力学试验较为困难。目前采用的常规方法是对原型级配堆石料进行缩尺, 从而通过缩

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目 (52008032); 国家自然科学基金-雅砻江联合基金重点项目 (U1765203); 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (CKSF2019394/GC)

收稿日期: 2020-06-04

尺后堆石料的室内试验结果推求现场原型级配堆石料的力学性质。《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)<sup>[3]</sup>中给出了4种粗粒料室内试验缩尺方法,但是这4种缩尺方法都无法完全避免缩尺效应的影响。众多学者通过研究发现,堆石料的力学特性与颗粒尺寸密切相关<sup>[4]</sup>。李翀等<sup>[5]</sup>通过开展等 $\sigma_3$ 应力路径试验发现,对于相同级配试样,破坏主应力差、内摩擦角和初始切线模量随试样直径 $D$ 的减小而增大,当试样直径相同时,破坏主应力差和内摩擦角随最大粒径 $d_{\max}$ 的增大而增大;花俊杰等<sup>[6]</sup>通过蠕变试验发现,大尺寸试样的最终蠕变量明显大于小尺寸试样,而尺寸效应对蠕变速率因子 $\lambda$ 的影响并无明显规律;邵晓泉等<sup>[7]</sup>发现在相同围压下,原型级配料试样的单颗粒强度低于缩尺级配料试样,颗粒破碎更严重,进而导致其偏应力增长缓慢,抗剪强度 $K$ 值显著降低;Varadarajan等<sup>[8]</sup>通过三轴排水试验发现圆形颗粒砂砾石的材料参数随颗粒大小的变化规律与棱角形颗粒堆石料的材料参数随颗粒大小的变化规律是相反的。

针对筑坝堆石料室内力学特性试验的缩尺效应问题<sup>[9]</sup>,本文提出了一种基于旁压试验的堆石料力学特性试验等效密度确定方法,即以旁压模量为控制指标,通过对比室内旁压模型试验和现场旁压试验结果确定室内试验的等效密度,最后通过开展三轴试验获得能反映现场原型级配堆石料力学特性的关键参数。研究成果有助于得到准确的现场原型级配堆石料的力学参数,提升高土石坝应力变形预测的精度,为我国特高土石心墙堆石坝建设提供重要技术支持。

## 1 堆石料大型旁压模型试验

### 1.1 试验设备

本次室内大型旁压模型试验所采用的加压和稳压装置为梅纳 G-AM(BX)型旁压仪,模型试验箱由60 mm厚的钢板制成,平面尺寸为0.86 m×0.84 m,高度为1.05 m。箱体上方对称布置4个50 t千斤顶组成自反力系统以提供上覆压力,加压盖四角对称布置位移传感器以测量试样的沉降量,旁压仪和模型试验箱如图1所示。



图1 旁压仪和模型试验箱

Fig. 1 Pressuremeter test gauge and model chamber

### 1.2 试验堆石料

试验材料取自两河口水电站心墙堆石坝上游堆石料,其原型设计级配最大粒径达到400~600 mm,超过室内试验的最大控制粒径,依据规范<sup>[3]</sup>中的方法对其进行缩尺,为了比较不同级配堆石料旁压模量与密度的关系,本次试验采用以下两种方法进行缩尺:

(1) 试验级配一:采用混合法进行缩尺,即先用相似级配法进行缩尺(相似比尺 $n=4$ ),使小于5 mm粒径的堆石料质量不高于总质量的30%,再采用等量替代法对超粒径部分进行缩尺。

(2) 试验级配二:先用相似级配法进行缩尺(相似比尺 $n=4$ ),再将级配曲线的最大粒径减小至60 mm。

缩尺后两组试验级配堆石料的最大粒径均为60 mm,但每个粒组区间的含量不同,堆石料缩尺前后的级配曲线如图2所示。

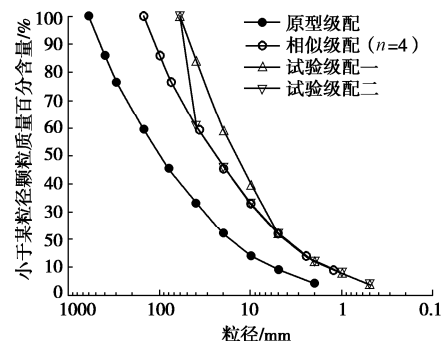


图2 堆石料试验级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of rockfill materials

综合考虑以往工程经验和室内试验设备尺寸,选定本次旁压模型试验的初始试验密度分别为1.95, 2.05, 2.10, 2.15 g/cm<sup>3</sup>。试验开始前对试样施加1000 kPa的上覆压力,待位移传感器读数稳定后读取稳压过程中试样的沉降值,再根据沉降值估算实际试验密度。

## 2 旁压试验结果分析

旁压模型试验开始前需要对弹性膜约束力进行标定以保障试验正常进行。试验中加荷等级按照预计临塑压力的1/5~1/7来确定,每级压力下分别在30 s和60 s时刻记录量管的水位下降值以得到测量腔的体积变化。旁压试验得到的级配一堆石料和级配二堆石料在不同密度下压力和体变的关系曲线分别如图3和图4所示。

图5(a), (b)分别为级配一堆石料和级配二堆石料的旁压模量和试验密度的关系曲线,其中试验密度为试样在上覆压力的作用下沉降稳定后的密度,即

正式开始旁压试验前的实际密度。从图 5 可以看出, 不同级配堆石料的旁压模量均随试验密度的增大而增大。在试验密度较小时, 旁压模量的变化曲线较为平缓, 随着试验密度逐渐增大, 堆石料内部颗粒填充逐渐紧密, 旁压模量对密度的变化更为敏感。当密度一定时, 不同级配堆石料对应不同的旁压模量, 说明了堆石料的力学特性与物理特性相关且具有唯一性。

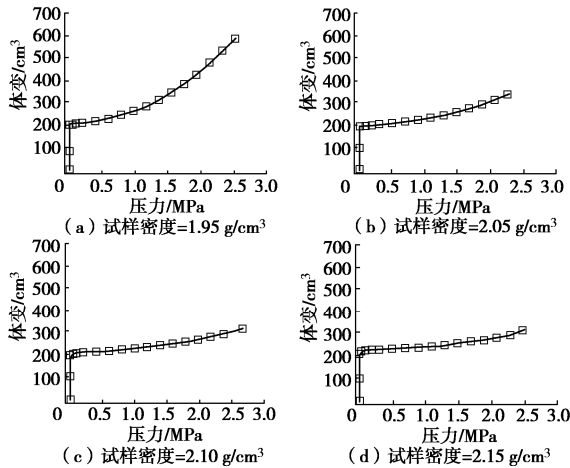


图 3 级配一堆石料在不同密度下的旁压试验曲线

Fig. 3 Pressuremeter test curves of rockfill No. 1 with different densities

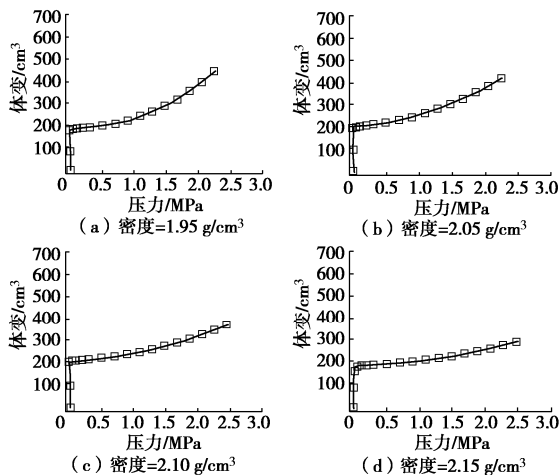


图 4 级配二堆石料在不同密度下的旁压试验曲线

Fig. 4 Pressuremeter test curves of rockfill No. 2 with different densities

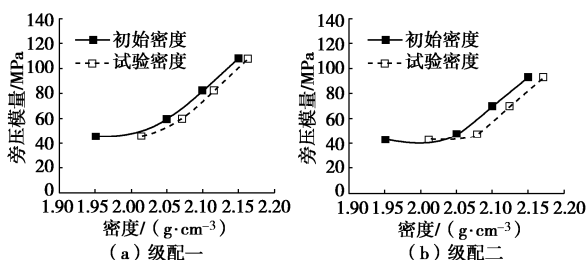


图 5 旁压模量和试验密度的关系曲线

Fig. 5 Relationship between pressuremeter modulus and density

### 3 三轴试验结果分析

采用长江科学院 YLSZ30-3 型高压三轴仪对两种级配的堆石料开展三轴试验研究, 该设备可采用应力和应变两种控制方式, 试样直径为 300 mm, 高度为 600 mm, 可施加最大围压为 3.0 MPa, 最大竖向应力为 21 MPa。大型三轴试验的试验级配与旁压模型试验保持一致, 试验密度根据旁压模量与试验密度的关系曲线来确定。如图 6 所示, 为了验证试验结果的合理性, 分别取旁压模量为 75 MPa 和 90 MPa 时对应的试验密度进行三轴试验。

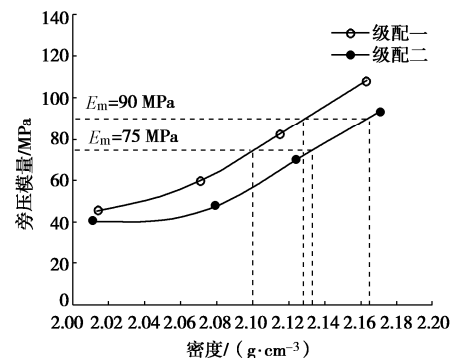


图 6 不同旁压模量对应的试验密度

Fig. 6 Densities corresponding to different pressuremeter moduli

三轴试验的试样经人工制备后充水进行饱和, 饱和完成后对试样施加围压进行固结, 待固结完成后开展固结排水剪切试验。本次三轴试验的围压分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 MPa, 剪切速率为 0.5 mm/min。试验过程中记录轴向荷载、轴向位移、排水量等数据, 试样剪切至轴向应变的 15% 时停止试验, 所有试验过程均严格依照规范执行。

#### 3.1 旁压模量为 75 MPa 的三轴试验结果分析

当旁压模量为 75 MPa 时, 级配一堆石料和级配二堆石料对应的试验密度分别为 2.100 g/cm³ 和 2.133 g/cm³, 图 7 所示为三轴试验得到的偏应力与轴向应变关系曲线。从图 7 可以看出, 两组级配和密度组合堆石料的偏应力与轴向应变关系曲线十分相似, 偏应力均随轴向应变的增加而增大, 最终趋于恒定值。说明达到一定的应力水平后, 试样已经破坏, 偏应力将不再随轴向应变的变化而变化。偏应力与轴向应变的关系受围压的影响较大, 当轴向应变一定时, 围压越大, 偏应力越大。图 8 所示为三轴试验得到的体积应变关系曲线, 可以看出, 堆石料的体积变化随围压的增大而增大, 在高围压下表现出明显的剪缩特性, 在低围压下表现出明显的剪胀特性, 两组堆石料的体变关系曲线变化规律基本一致。

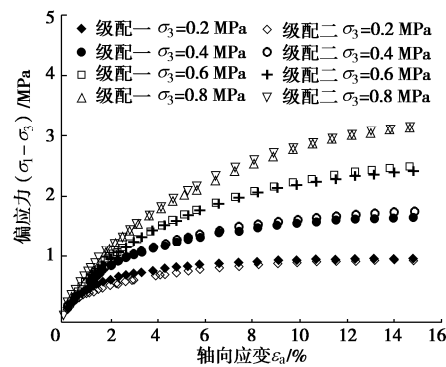


图 7 偏应力 - 轴向应变关系曲线( $E_a=75$  MPa)

Fig. 7 Relationship between deviatoric stress and axial strain ( $E_a=75$  MPa)

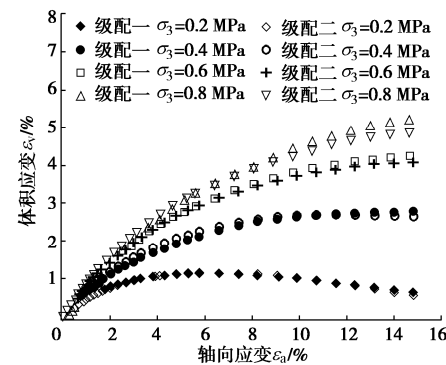


图 8 体应变 - 轴向应变关系曲线( $E_a=75$  MPa)

Fig. 8 Relationship between volumetric strain and axial strain ( $E_a=75$  MPa)

总体来说,不同级配和密度组合的堆石料,在旁压模量相等时,其偏应力与轴向应变关系曲线及体变关系曲线具有较好的一致性,说明不同级配堆石料在旁压模量相等时,其力学性质是相近的。

3.2 旁压模量为 90 MPa 的三轴试验结果分析

当旁压模量为 90 MPa 时,级配一堆石料和级配二堆石料对应的试验密度分别为 2.128 g/cm<sup>3</sup> 和 2.165 g/cm<sup>3</sup>,图 9 和图 10 分别为三轴试验得到的偏应力与轴向应变关系曲线和体积应变关系曲线。从图 9,10 可以看出,旁压模量为 90 MPa 时对应的两组堆石料的三轴试验结果与旁压模量为 75 MPa 时类似,即在旁压模量相等的情况下,不同级配和密度组合堆石料的偏应力与轴向应变关系曲线和体积应变与轴向应变关系曲线变化规律基本一致。总体上偏应力随轴向应变的增大而增大,最终趋于恒定值,堆石料的体积变化随围压的增大而增大,在高围压下表现出明显的剪缩特性,在低围压下表现出明显的剪胀特性。对于相同级配的堆石料,其旁压模量越大,试验密度越大,偏应力和体积应变对轴向应变的变化越敏感。以上结果同样验证了不同级配堆石料在旁压模量相等时,其力学性质是相近的。

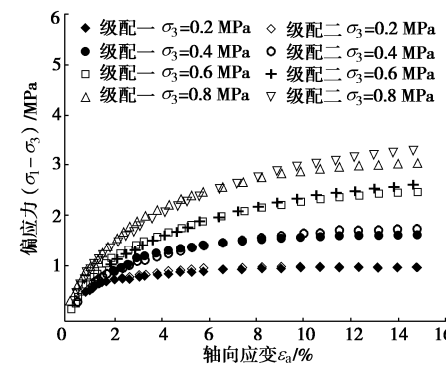


图 9 偏应力 - 轴向应变关系曲线( $E_a=90$  MPa)

Fig. 9 Relationship between deviatoric stress and axial strain ( $E_a=90$  MPa)

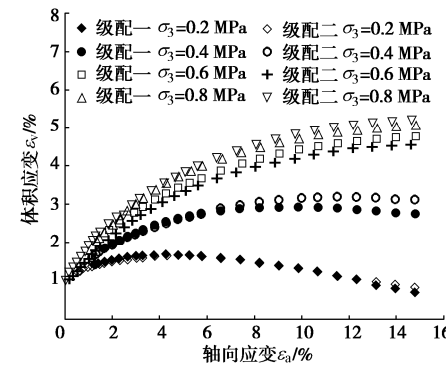


图 10 体积应变 - 轴向应变关系曲线( $E_a=90$  MPa)

Fig. 10 Relationship between volumetric strain and axial strain ( $E_a=90$  MPa)

3.3 邓肯张模型参数

根据三轴试验结果整理得出了不同级配和密度组合堆石料的邓肯张模型参数,如表 1 所示。通过分析发现,对于旁压模量相等的不同级配和密度组合堆石料,通过三轴试验得出的邓肯张模型参数十分接近,充分说明了不同级配和密度组合堆石料的力学性质在旁压模量相等的情况下是相近的。

表 1 不同级配和密度组合堆石料的邓肯张模型参数

Table 1 Parameters for Duncan-Chang model of rockfill with different gradations and densities

模型参数	级配一 2.100 g/cm <sup>3</sup>	级配二 2.133 g/cm <sup>3</sup>	级配一 2.128 g/cm <sup>3</sup>	级配二 2.165 g/cm <sup>3</sup>
$c/\text{MPa}$	0.047	0.054	0.059	0.048
$\varphi/(^\circ)$	40.5	40.3	39.7	41.3
$K$	642	547	991	818
$n$	0.13	0.22	0.13	0.10
$R_f$	0.83	0.83	0.89	0.86
$K_b$	229	180	467	457
$m$	0.08	0.13	0.08	0.07
$G$	0.32	0.37	0.44	0.47
$F$	0.19	0.30	0.34	0.38
$D$	3.93	4.72	4.15	3.98

4 结 论

基于大型旁压模型试验和大型三轴试验,针对筑

坝堆石料室内力学特性试验的试验密度进行了研究, 主要得出以下结论:

(1)提出了一种堆石料室内力学特性试验等效密度确定方法, 即以旁压模量为控制指标, 通过室内旁压试验建立堆石料旁压模量与密度的关系曲线, 然后与现场原型级配料的旁压模量进行对比确定室内力学试验的等效密度, 最后通过三轴试验等获得能反映现场原型级配堆石料力学特性的关键参数。

(2)当级配和应力状态一定时, 堆石料的旁压模量随密度的增大而增大, 试验密度越大, 旁压模量对密度的变化越敏感, 密度相同时不同级配的堆石料对应不同的旁压模量, 说明堆石料的力学特性与物理特性相关且具有唯一性。

(3)在材质、颗粒形态及应力状态相同的情况下, 当旁压模量相等时不同级配和密度组合堆石料的力学特性是相近的, 说明通过建立同源堆石料旁压模量与密度的关系曲线, 将旁压模量作为控制指标确定筑坝堆石料室内力学特性试验等效密度的方法是可行的。

#### 参考文献:

- [1] 陈生水. 复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(10): 1040 - 1048. (CHEN Sheng-shui. Research progresses in key technologies for construction and long-term safety protection of extra high earth-rock dams under complicated conditions[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(10): 1040 - 1048. (in Chinese))
- [2] 酆能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (LI Neng-hui. New Technology Of High Concrete Face Rockfill Dam[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [4] 傅 华, 韩华强, 凌 华. 粗粒料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645 - 2649. (FU Hua, HAN Hua-qiang, LING Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2645 - 2649. (in Chinese))
- [5] 李 翀, 何昌荣, 王 琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 567 - 570. (LI Chong, HE Chang-rong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 567 - 570. (in Chinese))
- [6] 花俊杰, 周 伟, 常晓林, 等. 堆石体应力变形的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 328 - 335. (HUA Jun-jie, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Study of scale effect on stress and deformation of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 328 - 335. (in Chinese))
- [7] 邵晓泉, 迟世春, 陶 勇. 堆石料剪切强度与变形的尺寸效应模拟[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1766 - 1772. (SHAO Xiao-quan, CHI Shi-chun, TAO Yong. Numerical simulation of size effect on shear strength and deformation behavior of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1766 - 1772. (in Chinese))
- [8] VARADARAJAN A, SHARMA K, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(3): 206 - 218.
- [9] 翁厚洋, 朱俊高, 余 挺, 等. 粗粒料缩尺效应研究现状与趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 425 - 429. (WEN Hou-yang, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. Status and tendency of study on scale effects of coarse-grained materials[J]. Journal of HoHai University(Natural Sciences), 2009, 37(4): 425 - 429. (in Chinese))

(编校: 明经平)