

海积软黏土力学特性与应力路径的关联性研究

熊春发¹, 孔令伟¹, 杨爱武^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384)

摘 要: 通过固结不排水条件下的等应力比加荷试验, 探讨了原状海积软黏土的应力应变关系、切线模量、孔压特性与应力路径的关联性。结果表明, 同样固结压力下, 在 $0.25\pi \leq \theta \leq 0.75\pi$ 的试验应力路径范围内, 随着应力路径方向角 θ 的增大, 土体的切线模量逐渐增大, 极限强度先增大后减小, 在 $\theta=0.44\pi \sim 0.56\pi$ 间存在峰值; 单位剪应力引起的孔压与单位球应力引起的孔压呈线性关系, 且随着应力路径方向角的增大, 孔压由正孔压逐渐变为负孔压, 球应力引起孔压与剪应力引起孔压的比例线性减小。

关键词: 海积软黏土; 应力路径; 力学特性; 关联性

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0341-05

作者简介: 熊春发(1982-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 主要从事特殊土力学方面的研究工作。E-mail: bear0306@163.com。

Correlation between mechanical properties of marine soft clay and stress path

XIONG Chun-fa¹, KONG Ling-wei¹, YANG Ai-wu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Civil Engineering College, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300380, China)

Abstract: Through triaxial tests on different stress ratios under consolidated and undrained conditions, the correlation among stress-strain curve of undisturbed marine soft clays, tangent modulus, pore pressure and stress path is discussed. The results show that, under the same consolidation pressure, when the direction angle of the stress path increases, the tangent modulus will increase, the ultimate strength will change from increasing to decreasing and reach the peak value in the range of $\theta=0.44\pi \sim 0.56\pi$. There is a linear relationship between the unit pore pressure caused by shear stress and the unit pore pressure caused by isotropic stress. When the direction angle of the stress path increases, the pore pressure will change from positive to negative, and the ratio of the pore pressure caused by isotropic stress to the shear stress will decrease linearly.

Key words: marine soft clay; stress path; mechanical property; correlation

0 引 言

土的性质不仅取决于当前的应力状态, 而且与土的类型、应力历史和后续加载方向有关。在岩土工程施工过程中, 土体会经历不同的应力路径, 而应力路径会对土体力学特性产生显著影响。常规三轴压缩试验结果用于基坑开挖等非常规路径分析时, 常导致计算结果与实际情况差距较大, 因此研究不同应力路径下土体的力学特性就显得十分重要。

国内外学者对于各种应力路径下土体的力学特性做了大量研究, 其中, 文献[1, 2]详细阐述了原状黏性土在等 p (球应力)、增 p 、减 p 路径下的应力应变关系、孔压及强度特性; 刘恩龙等^[3]对人工制备结构性土进行了常围压、减围压和增围压路径下的排水与不排水三轴试验研究; Callisto 等^[4]分析了真三轴应力路径下天然硬黏土的力学特性; 文献[5~7]则研究了

基坑开挖时土体卸荷模量与应力路径的关联性。此外, 文献[8~11]对不同固结比和不同路径下土体力学特性的归一化特性进行了探讨。上述研究丰富了人们对于某些路径下土体力学特性的认识, 但在土体力学特性与应力路径的关联性方面, 系统的考察分析工作进行得较少, 因此, 开展此方面研究, 可以丰富对于土体在复杂受力条件下力学特性变化规律的认识, 并有一定理论意义和实用价值。

本文以原状天津海积软黏土作为研究对象, 设计不同加荷应力比的固结不排水三轴试验, 分析土体的应力应变关系、切线模量、孔压特性与应力路径的关联性, 以为软黏土地区工程施工提供一定理论参考。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2011CDA124)
收稿日期: 2013-06-07

1 试验方案与方法

1.1 试样及试验方法

试验土样取自天津滨海新区，取土深度为地面下 13.5~16.5 m，其主要物理力学指标：比重=2.75，干密度=1.30 g/cm³，含水率=39.0%，孔隙比=1.1，液限=41.8%，塑限=23.4%，塑性指数=18.4%，液性指数=0.85，渗透系数=3.0×10⁻⁸ cm/s，c=23 kPa，φ=17°。固结试验求得土样先期固结压力为 103 kPa。

试验设备采用 GDS 公司研制的应力路径三轴仪，该仪器可实现轴压 σ_a 和围压 σ_r 完全独立施加。试验方法为等压固结不排水三轴剪切，固结压力 p_c 分别取 51, 103, 154 kPa，剪切速率（单位时间内剪应力的变化量）v=dq/dt=0.05 kPa/min。试验通过同步改变轴压和围压，以不同加荷应力比 k=dq/dp（剪应力与球应力变化量比值）来模拟不同应力路径。

1.2 试验应力路径

应力路径试验方案详见表 1 和图 1，其中 θ 表示应力路径方向角，即应力路径与 p 轴正向的夹角。应力路径的命名规则为：前一字母和后一字母分别代表轴压和围压的变化情况，L(load)为加荷，U(unload)为卸荷，C(constant)为荷载不变，括号内数值为加荷应力比 k，如 LU(if)表示增加轴压，减小围压，p 保持不变，q 增大的路径，此时 k=dq/dp=∞，括号内 if (infinity) 表示无穷大。

表 1 应力路径试验方案

Table 1 Schemes of stress path tests

路径名称	路径方向角 θ/(°)	路径方向角 θ/π
LL(1)	45.0	0.25
LC(3)	71.6	0.40
LU(5)	78.7	0.44
LU(if)	90.0	0.50
LU(-5)	101.3	0.56
CU(-1.5)	123.7	0.69
UU(-1)	135.0	0.75

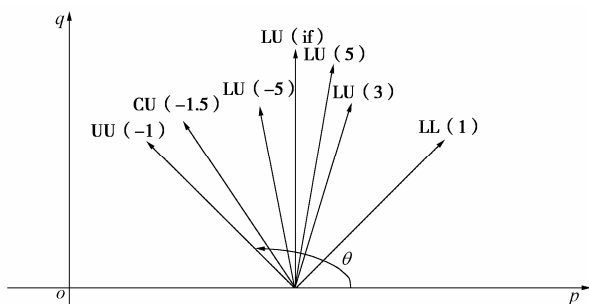


图 1 应力路径试验方案示意图
Fig. 1 Schemes of stress path tests

2 试验结果和分析

2.1 应力应变关系与应力路径的关联性

由于原状土存在各向异性，不同应力路径下的 q - ε_a（剪应力 - 轴应变）曲线并不相同（图 2）。

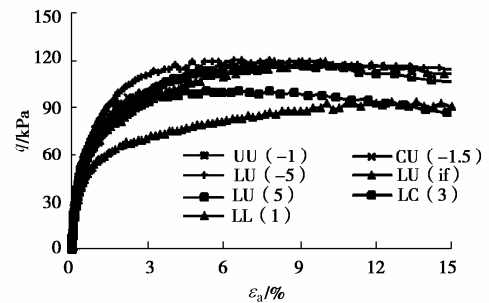


图 2 不同应力路径下 q - ε_a 关系曲线 (p_c=103 kPa)

Fig. 2 q - ε_a curve under different stress path

由图 2, 3 可知，不同应力路径及固结压力下的 q - ε_a 曲线都可表示为双曲线形式：

$$q = \frac{\varepsilon_a}{a\varepsilon_a + b} \quad (1)$$

式中，参数 a, b 为分别为土体极限强度 q_f 的倒数和初始切线模量 E_i 的倒数。q_f, E_i 随应力路径及固结压力变化的曲线见图 4, 5。由图可知，随着应力路径方向角 θ 的增大，初始切线模量逐渐增大；极限强度先增大后减小，在 θ=0.44π~0.56π 间存在峰值；随着固结压力的增大，初始切线模量和峰值强度都近似线性增大。

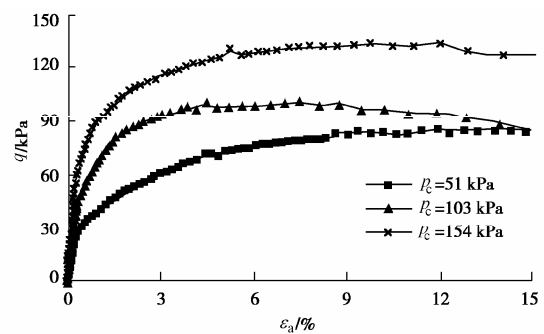


图 3 不同固结压力下 q - ε_a 关系曲线 (LC(3)路径)

Fig. 3 q - ε_a curves under different consolidation pressures

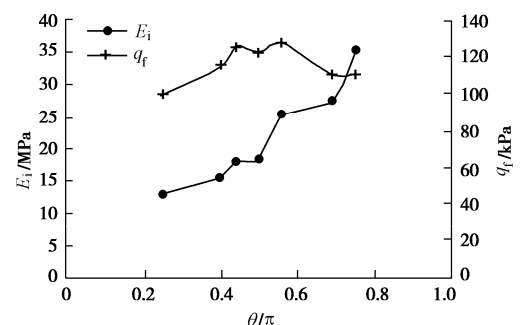


图 4 参数 E_i, q_f 随应力路径变化曲线

Fig. 4 Curves of parameters E_i and q_f under different stress paths

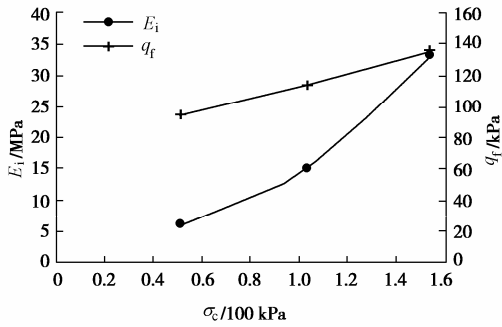


图 5 参数 E_t , q_t 随固结压力变化曲线

Fig. 5 Curves of parameters E_t and q_t under different consolidation pressures

2.2 切线模量与应力路径的关联性

由式 (1) 可进一步得到切线模量-应变关系式:

$$E_t = \frac{dq}{d\varepsilon_a} = \frac{b}{(a\varepsilon_a + b)^2} \quad (2)$$

$\varepsilon_a=0$ 时, 初始切线模量为

$$E_t = \frac{1}{b} \quad (3)$$

式 (2) (3) 中参数 a , b 分别为土体极限强度 q_f 的倒数和初始切线模量 E_t 的倒数。由图 6, 7 可知, 同样固结压力下, 随着应力路径方向角 θ 的增大, 切线模量也逐渐增大, 不同路径下切线模量大小关系为 $UU > CU > LU > LC > LL$, 即轴向径向同时卸荷时最大, 轴向径向同时加荷时最小。又由图 8 可知, 当 $\varepsilon_a=1\%$ 时, 不同路径和固结压力下的切线模量已基本相同。

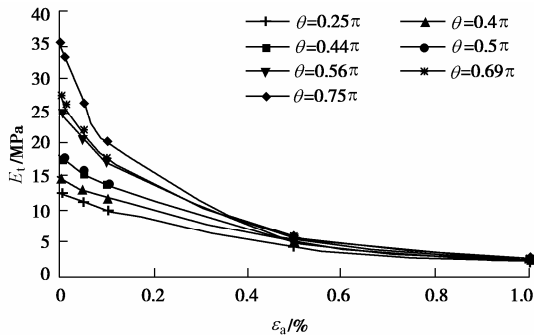


图 6 不同应力路径下 $E_t - \varepsilon_a$ 关系曲线 ($p_c=103$ kPa)

Fig. 6 $E_t - \varepsilon_a$ curves under different stress paths

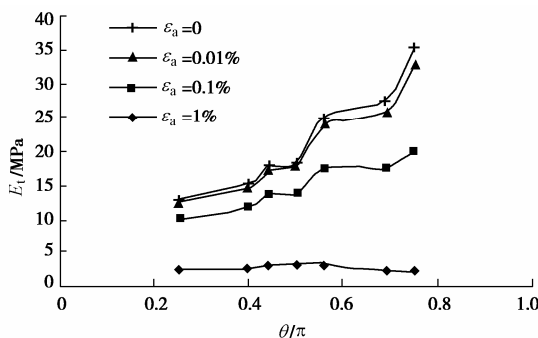


图 7 不同应变下 $E_t - \theta$ 关系曲线 ($p_c=103$ kPa)

Fig. 7 $E_t - \theta$ curves under different strains

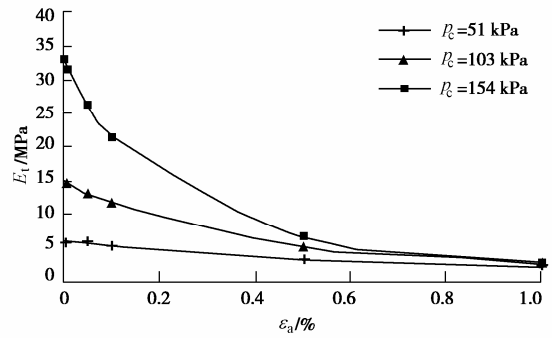


图 8 不同固结压力下 $E_t - \varepsilon_a$ 关系曲线 (LC(3) 路径)

Fig. 8 $E_t - \varepsilon_a$ curves under different consolidation pressures

2.3 孔压特性与应力路径的关联性

增 p 路径 (加荷应力比 $k > 0$) 土体有体缩趋势, 产生正孔压, 减 p 路径 (加荷应力比 $k < 0$) 土体有体胀趋势, 产生负孔压。同等固结压力和应变时, 随着应力路径方向角 θ 的增大, 土体逐渐由体缩转为体胀趋势, 孔压由正孔压逐渐变为负孔压。同等固结压力和应变时, 不同加荷路径下土体的孔压大小关系为 $LL > LC > LU > CU > UU$ (图 9), 即轴向径向同时加荷时最大, 轴向径向同时卸荷时最小。

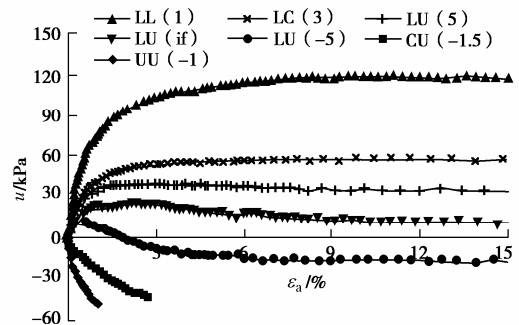


图 9 不同应力路径下 $u - \varepsilon_a$ 关系曲线 ($p_c=103$ kPa)

Fig. 9 $u - \varepsilon_a$ curves under different stress paths

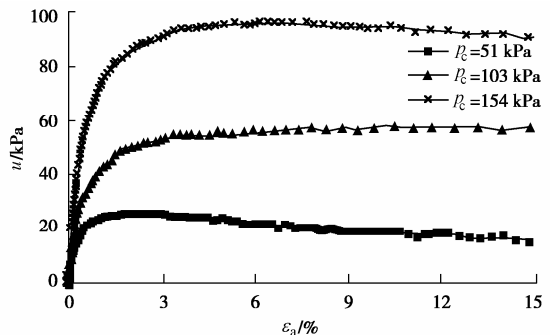


图 10 不同固结压力下 $u - \varepsilon_a$ 关系曲线 (LC(3) 路径)

Fig. 10 $u - \varepsilon_a$ curves under different consolidation pressures

$u - \varepsilon_a$ 曲线归一化存在困难 (见图 9, 10), 考虑到孔压与球应力 p 、剪应力 q 的变化有关, 考察不同应力路径、不同固结压力下单位剪应力引起的孔压 u/q 与单位球应力引起的孔压 $u/(p - p_c)$ 关系, 可知 u/q 与

$u/(p - p_c)$ 呈线性关系 (见图 11, 12):

$$\frac{u}{q} = n + m \frac{u}{p - p_c} \quad (4)$$

式中, m, n 分别为 $u/q \sim u/(p - p_c)$ 直线的斜率和截距, 其中 n 值在不同固结压力和路径下都接近于 0, m 值反映的是球应力引起的孔压与剪应力引起的孔压的比例, 基本不受固结压力影响, 而与应力路径方向角 θ 有关, 随着 θ 的增大, m 值线性减小 (图 13, 14)。由式 (4) 可得孔压 u 的表达式:

$$u = \frac{nq}{1 - m \frac{q}{p - p_c}} = \frac{nq}{1 - m \tan \theta} \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 软黏土的孔压由球应力和剪应力共同引起, 并与应力路径方向角有关。

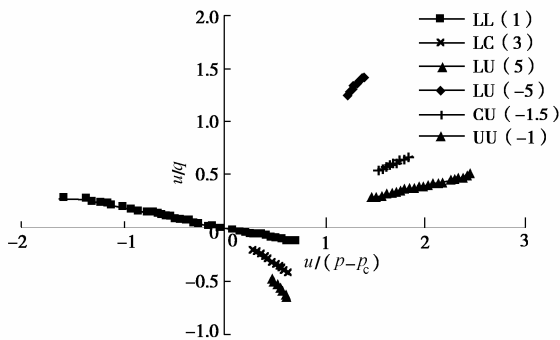


图 11 不同应力路径下 $u/q - u/(p - p_c)$ 关系图 ($p_c = 103 \text{ kPa}$)
Fig. 11 $u/q - u/(p - p_c)$ curves under different stress paths

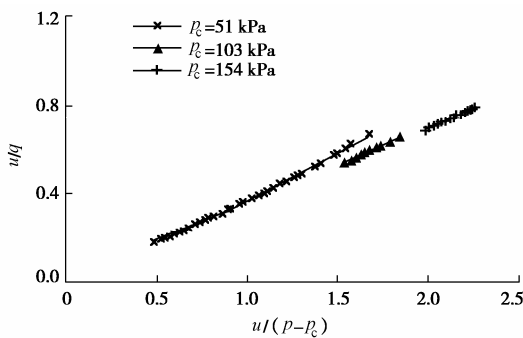


图 12 不同固结压力下 $u/q - u/(p - p_c)$ 关系图 (LC(3) 路径)
Fig. 12 $u/q - u/(p - p_c)$ curves under different consolidation pressures

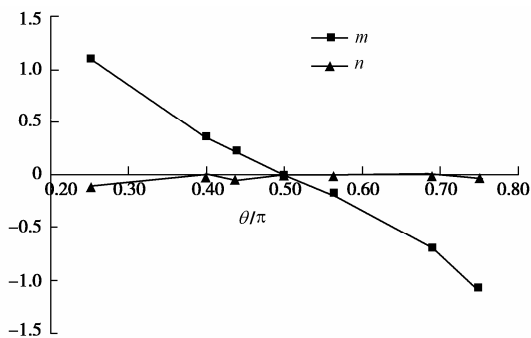


图 13 参数 m, n 与应力路径关系

Fig. 13 Relationship among parameters m, n and stress path

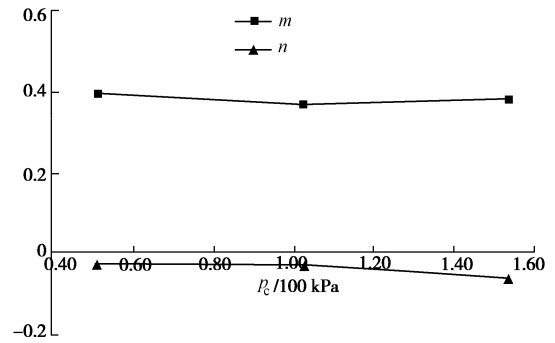


图 14 参数 m, n 随固结压力变化曲线

Fig. 14 Curves of parameters m and n under different consolidation pressures

3 结 论

(1) 固结不排水剪时, 不同路径下原状软黏土的应力应变关系曲线存在差异。同样固结压力和应变下, 随着应力路径方向角 θ 的增大, 初始切线模量逐渐增大; 极限强度先增大后减小, 在 $\theta = 0.44\pi \sim 0.56\pi$ 间存在峰值。

(2) 不同应力路径下土体的切线模量不同。同样固结压力和应变下, 随着应力路径方向角的增大, 切线模量逐渐增大; 当轴应变 $\varepsilon_a = 1\%$ 时, 不同路径和固结压力下的切线模量基本相同。

(3) 单位剪应力引起的孔压与单位球应力引起的孔压呈线性关系; 随着应力路径方向角的增大, 球应力引起孔压与剪应力引起孔压的比例线性减小。

参考文献:

- [1] 曾玲玲, 陈晓平. 软土在不同应力路径下的力学特性分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1264 - 1270. (ZENG Ling-ling, CHEN Xiao-ping. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1264 - 1270. (in Chinese))
- [2] 常银生, 王旭东, 宰金珉, 等. 黏性土应力路径试验 [J]. 南京工业大学学报, 2005, 27(5): 6 - 11. (CHANG Yin-sheng, WANG Xu-dong, ZAI Jin-min, XU Jian-long. Stress path tests of cohesive soil [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2005, 27(5): 6 - 11. (in Chinese))
- [3] 刘恩龙, 沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2058 - 2064. (LIU En-long, SHEN Zhujiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2058 - 2064. (in Chinese))
- [4] CALLISTO L, RAMPOLLO S. Shear strength and small-strain

- stiffness of a natural clay under general stress conditions[J]. Géotechnique, 2002, **52**(8): 547 – 560.
- [5] CHARLES W W Ng. Stress paths in relation to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(5): 357 – 363.
- [6] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 18 – 23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(6): 18 – 23. (in Chinese))
- [7] 张培森, 郭进军, 颜 伟. 小应变下基坑开挖应力路径对剪切模量的影响[J]. 交通科学与工程, 2010, **26**(2): 16 – 20. (ZHANG Pei-sen, GUO Jin-jun, YAN Wei. Effect of shear module to stress path of deep excavation under small strain [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, **26**(2): 16 – 20. (in Chinese))
- [8] 张荣堂, 陈守义. 减 P 路径下饱和软黏土应力应变性状的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(5): 612 – 616. (ZHANG Rong-tang, CHEN Shou-yi. An experimental study on stress-strain behavior of soft clay along decreasing average normal stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(5): 612 – 616. (in Chinese))
- [9] 陈存礼, 杨 鹏, 郭 娟. 等应力比应力路径下饱和原状黄土的孔压特性[J]. 水利学报, 2007, **38**(8): 907 – 913. (CHEN Cun-li, YANG Peng, GUO Juan. Pore water pressure characteristics of saturated intact loess under constant stress ratio stress paths [J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2007, **38**(8): 907 – 913. (in Chinese))
- [10] 江美英, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 应力路径对饱和黄土孔压的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(3): 498 – 502. (JIANG Mei-ying, LUO Ya-sheng, WANG Rui-rui, GUO Hong. Influence of stress path on the pore pressure of saturated loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(3): 498 – 502. (in Chinese))
- [11] 梁 燕, 谢永利, 刘保健. 应力路径对黄土固结不排水剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, **28**(2): 364 – 366. (LIANG Yan, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Influence of stress path on consolidated undrained shear strength of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(2): 364 – 366. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)