

DOI: 10.11779/CJGE2015S1005

# 降压回灌作用下黏土的渗透特性试验研究

张扬清, 冉岸绿, 武朝军, 陈锦剑, 王建华

(上海交通大学土木工程系, 200240 上海)

**摘要:** 为控制深基坑降水和承压水降压引起的土体沉降问题, 通常采用坑外回灌措施, 而软黏土渗透特性在抽水回灌过程中出现的变化会影响回灌效果和土体变形特性。采用 GDS 三轴试验仪对上海黏土土样进行室内降压回灌模拟试验, 研究降压回灌的渗流作用对黏土渗透特性的影响规律。试验通过设置围压和初始孔压来控制土样应力水平, 利用反压变化模拟孔隙水的降压和回灌过程, 测试土样的渗流变化与变形, 从而分析土样孔隙比、渗透系数等参数的变化规律。研究发现, 渗透系数在降压阶段因孔隙比减小而降低, 并存在非线性关系; 土体孔隙比在回灌阶段逐渐增大, 但渗透系数因堵塞效应而呈现进一步降低趋势; 可用  $e - \lg k$  拟合曲线建立孔隙比与渗透系数之间的非线性关系。

**关键词:** 黏土; 降压回灌; 模拟试验, 孔隙比; 渗透性; 堵塞效应

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S1-0021-05

作者简介: 张扬清(1991-), 男, 博士, 主要从事地基处理及基坑工程方面的研究。E-mail: zyqlyt@163.com.

## Experimental study on permeability properties of soft clay in process of pumping and recharge

ZHANG Yang-qing, RAN An-lü, WU Chao-jun, CHEN Jin-jian, WANG Jian-hua

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** For controlling the settlement caused by dewatering of deep foundation pits, the method of recharging is usually adopted. But the permeability coefficient of soft clay may change along with the variation of void ratio during the pumping and recharge, and it will affect the results of recharging and deformation characteristics of soils. For studying the permeability characteristics of Shanghai typical soft clay under the effect of pumping and recharge, the pumping and recharge tests were carried out on the soft clay by using the GDS triaxial apparatus. During the tests, the soil stress level is controlled by setting the radial pressure and initial pore pressure. Meanwhile, the process of pumping and recharge is simulated by changing the back pressure. The void ratio and permeability coefficient are obtained by dealing with the experimental results and data. The study shows that the permeability coefficient has a nonlinear relationship and a decreasing trend along with the decrease of void ratio during the pumping. During the recharge, with the increase in void ratio, the permeability coefficient has a decreasing trend due to the blockage effect and is smaller than that at the pumping stage. Meanwhile, the nonlinear relationship between permeability coefficient and void ratio can be fitted using the function of  $e - \lg k$ .

**Key words:** soft clay; pumping and recharge; simulation test; void ratio; permeability; blockage effect

## 0 引言

在地下潜水位或承压含水层埋深较浅的场地进行深基坑施工时, 通常需对地下水进行降水降压施工。为控制因深基坑降水和承压水降压而引起的周围土体沉降, 越来越多的工程采用坑外地下水回灌措施<sup>[1-3]</sup>。在降水和回灌过程中, 土体的物理力学性质会发生变化, 从而影响土层的渗流与变形。为更有效地分析预测土层渗流变形规律以指导设计施工, 有必要研究土体在降压回灌作用下的渗透变形特性。

对于土体渗透系数在抽水或回灌过程中因孔隙比变化而出现非线性变化的情况, 国内外学者已有很多

研究<sup>[4-10]</sup>。谢康和等<sup>[6]</sup>采用 GDS 固结仪对萧山黏土试样进行了一维固结渗透联合试验, 提出黏土渗透性随固结压力增加呈现非线性减少, 并讨论总结了 4 种非线性渗透模型的土性参数。张明等<sup>[7]</sup>采用 GDS 固结仪对深圳前湾吹填淤泥进行固结渗透试验, 提出了适用于吹填淤泥等超软土大变形与非线性固结性状数值分析的渗透系数与孔隙比之间的幂函数非线性渗透关系。对于回灌对土体渗透系数的影响, 单蓓蓓等<sup>[8]</sup>采

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330633); 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201311045-03)

收稿日期: 2015-03-26

用土柱渗流试验，模拟人工回灌过程中含水层的物理堵塞过程。张晓婉等<sup>[9]</sup>通过试验研究了地下水人工回灌过程中微生物堵塞对含水介质渗透系数的影响。以上研究大多是基于降压或回灌单一过程中土体渗透系数的研究，缺少对土体在降压回灌联合作用下土体渗透特性的研究。

本文采用 GDS 三轴试验仪对上海典型软黏土进行了室内降压回灌的模拟试验，研究软黏土在降压回灌作用下的渗透及变形特性。

## 1 试验原理与方法

### 1.1 试验原理与设备

采用 GDS 三轴试验仪进行降压回灌室内模型试验。图 1 为三轴模拟试验示意图。试验通过设置围压和初始孔压来控制土样应力水平，利用反压变化改变土体内的孔隙水压力，从而控制土样内孔隙水渗流过程，最终达到模拟孔隙水降压和回灌的目的。同时测试土样的渗流变化与变形，从而分析土样在降压回灌过程中孔隙比及渗透系数等参数的变化规律。

试验中记录孔隙水压力的消散和累积过程，同时记录试样的体积变化。此外，在围压室内土样上还安装了一对可测量土样真实变形的霍尔效应传感器，通过其测得的局部轴向应变和径向应变可以得到较为准确的土样体积应变，并与体变计得到体积应变相比较加以验证。

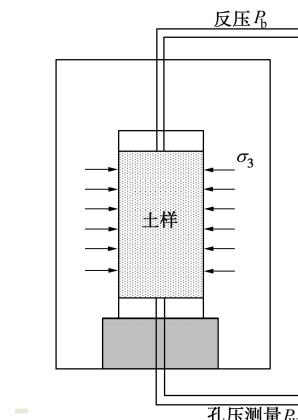


图 1 三轴模拟试验示意图

Fig. 1 Sketch of triaxial tests

### 1.2 试验步骤与过程

试验所用土样取自上海市典型黏土第④层土，试验土样尺寸为  $\phi 61.8 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 。将制作好的试样置于围压室底座上；将排水管一端与三轴试验仪围压室上方的排水孔相连，另一端与反压控制装置相连；接着对试样进行密封处理，之后设置好围压值与初始反压值，保持围压不变，通过控制反压的升降来模拟回灌与降压，同时通过计算机上的采集软件进行数据

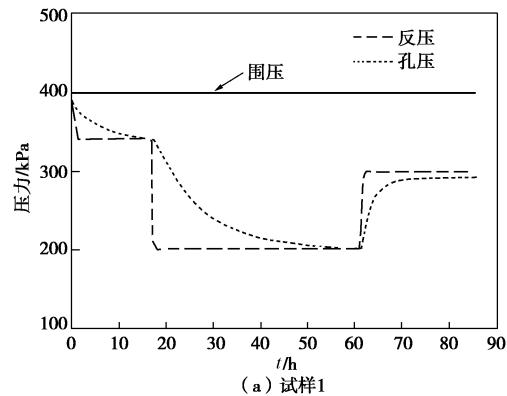
的采集。

对两个试样分别进行试验，首先通过两步加载，将围压和初始反压分别稳定在 400 kPa 和 390 kPa，待整个试样应力状态和变形稳定（即初始固结完成）以后，开始正式进入模拟降压回灌试验；首先进行降压试验，两试样均采用两级降压，且总降压值一致，均为 190 kPa；之后进行回灌试验，试样 1 采用一级回灌，试样 2 采用二级回灌，总回灌值一致，均为 100 kPa。试验中压力设置变化情况见表 1，图 2 为试样 1 与试样 2 的试验过程各压力变化图。

表 1 试验压力设置

Table 1 Pressure setting

土样编号	围压/kPa	反压/kPa
1	400	390→340→200→300
2	400	390→300→200→250→300



(a) 试样1

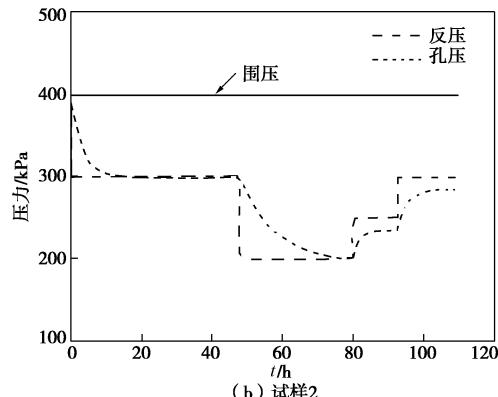


图 2 试验过程中各压力变化图

Fig. 2 Variation of pressure of samples during tests

## 2 试验结果

试验过程中测试得到的孔隙水压力变化过程如图 2 所示。从图中可以看出，两试样的孔压值都会随着反压值的减小或增大而做出相应的变化，最终会趋于稳定。

试验之前测试了土样的初始含水率  $w_0$ 、初始孔隙比  $e_0$  和重度  $r_s$ 。根据试验过程测试得到的试样体积变

化量, 降压回灌过程中第  $i$  次测量结果的孔隙比  $e_i$  为

$$e_i = e_{i-1} - (1 + e_{i-1}) \frac{\Delta V_i}{V_i}, \quad (1)$$

式中,  $e_{i-1}$  为第  $i-1$  次测量结果计算得出的孔隙比,  $V_i$  为第  $i$  次计算的初始体积,  $\Delta V_i$  是第  $i$  次计算中  $\Delta t_i$  时间内试样的体积变化值。由式(1)可知, 孔隙比是根据体积应变的试验结果换算而得, 可在一定程度上反映试样的变形情况。根据计算结果作出如图 3 所示的孔隙比随时间的变化情况图。

从图 3 中可以看出, 随着反压的减小, 即模拟降压的进行, 有效应力逐渐增大, 土样逐渐被压缩, 孔隙比相应出现减小; 反压增大时, 即模拟回灌的进行, 有效应力逐渐减小, 土样出现了一定的回弹, 孔隙比相应出现一定的增大, 但从试样 2 的试验中可以看出, 在相同的孔压差为 100 kPa 的情况下, 回弹量比压缩量要小得多。

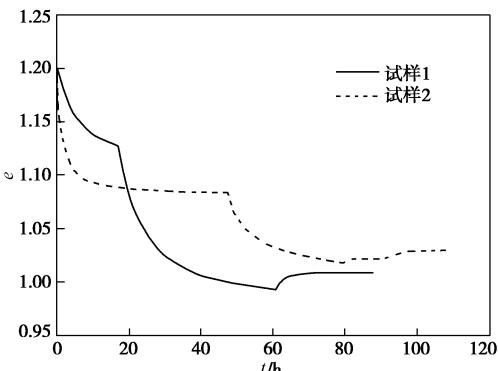


图 3 孔隙比随时间变化图

Fig. 3 Variation of void ratio with time

### 3 降压回灌对渗透特性的影响分析

对试验数据进行整理, 土样孔压每变化 20 kPa 取一组数据, 则第  $i$  组数据的渗透系数  $k_i$  采用变水头渗流计算公式进行计算:

$$k_i = \frac{\gamma_w L \Delta V_i}{A(P_{li} - P_{2i}) \Delta t_i} \ln \frac{P_{li} - P_{bi}}{P_{2i} - P_{bi}}, \quad (2)$$

式中,  $P_{li}$  为第  $i$  次计算的起始孔压,  $P_{2i}$  为第  $i$  次计算的终值孔压,  $P_{bi}$  为第  $i$  次计算的背压,  $\Delta t_i$  为孔压从  $P_{li}$  下降到  $P_{2i}$  的时间间隔,  $\Delta V_i$  是  $\Delta t_i$  时间内试样的体积变化值,  $L$  和  $A$  分别为试样的高度与截面积,  $\gamma_w$  为水的重度。通过弹性模量计算式计算得出弹性模量:

$$E = \frac{\sigma'}{\Delta V_i / V_i} \quad (3)$$

式中,  $\sigma'$  为有效应力。

对降压与回灌过程, 均采用同一方法进行渗透系数的计算, 由于从土中水的渗流过程分析, 回灌, 即

向土中注水是抽水的逆过程, 期间水头差也一直随时间而变化, 故对回灌过程也可采用变水头渗流计算公式计算渗透系数, 计算结果如表 2 所示。由表中可见, 降压过程中, 土样在经过 20~200 kPa 有效应力作用后, 渗透系数降低了约 3/4。

表 2 土样 1, 2 渗透试验结果汇总

Table 2 Permeability test results of soil samples 1 and 2

孔压变化 /kPa	步 骤	试样 1		试样 2	
		$e$	$k$ $/(10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$e$	$k$ $/(10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
380→360	降	1.177	5.812	1.161	5.929
360→340	压 1	1.142	5.576	1.128	5.874
340→320		1.107	2.428	1.113	4.974
320→300		1.083	1.958	1.099	4.739
300→280	降	1.065	1.749	1.068	1.922
280→260	压	1.048	1.583	1.055	1.750
260→240	2	1.033	1.479	1.045	1.535
240→220		1.019	1.435	1.036	1.445
220→200		1.177	—	1.025	1.492
200→220		1.018	1.101	1.021	1.052
220→240	回	1.022	1.054	1.023	0.893
240→260	灌	1.025	0.917	1.026	0.804
260→280	1	1.027	0.800	1.028	0.752
280→300		1.029	0.714	—	—

#### 3.1 降压作用分析

软黏土的渗透系数随排水固结过程中孔隙比的减小呈非线性减小, 故考虑软黏土的  $e - \lg k$  渗透关系, 根据试验结果作出如图 4 所示的  $e - \lg k$  渗透关系图。从图 4 与表 2 可以看出, 对于试样 1 与试样 2, 两者渗透压力差一致, 初始孔隙比接近, 其渗透系数随孔隙比的变化趋势接近, 对其  $e - \lg k$  渗透关系进行回归拟合, 得出其拟合关系为

$$\lg k = -13.63 + 4.64e \quad (4)$$

验证了软黏土渗透系数在固结过程中与孔隙比的非线性关系。随着降压的进行土样孔隙比逐渐减小, 有效应力增大, 土样被压缩, 渗透系数呈非线性减小, 压缩模量随之逐渐增大。

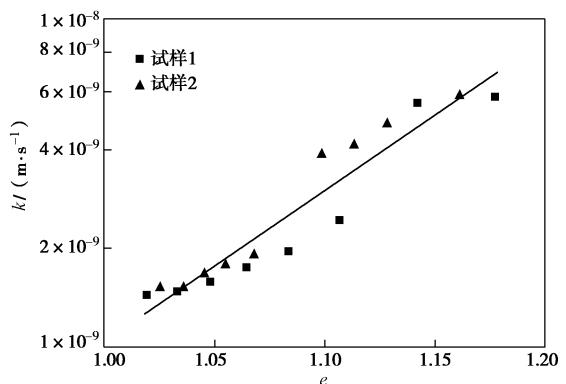


图 4 降压阶段的  $e - \lg k$  渗透关系图

Fig. 4  $e - \lg k$  permeability relationship during pumping

### 3.2 回灌作用分析

图5是回灌阶段的孔隙比与渗透系数的 $e - \lg k$ 渗透关系图,从图中可以看出,回灌阶段,两试样的渗透压力差均为100 kPa,且初始孔隙比接近,两者的渗透系数随孔隙比的变化趋势接近,对其 $e - \lg k$ 渗透关系进行回归拟合,得出其拟合关系式为

$$\lg k = 10.10 - 18.70e \quad (5)$$

可用于上海地区软黏土在回灌阶段时渗透系数的确定。从图5和表2中可以看出,随着回灌的进行土样孔隙比逐渐增大,土样出现少量回弹,回弹模量随之出现增大趋势,但渗透系数随着孔隙比的增大反而出现了减小,这可能是由于回灌时,注入的水中带有细颗粒、有机物和空气,水在土中渗流时,速度减小,水中所携带的细颗粒将沉淀在土骨架中,同时水中带来的空气停留在微小空隙中,这些情况会导致堵塞效应<sup>[10]</sup>,从而导致了回灌渗透系数的减小。

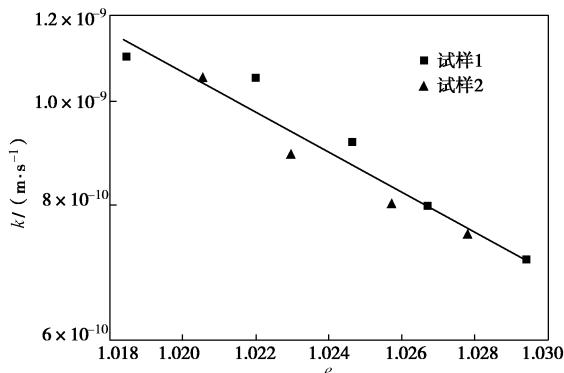


图5 回灌阶段的 $e - \lg k$ 渗透关系图

Fig. 5  $e - \lg k$  permeability relationship during recharge

### 3.3 比较与讨论

由以上对两试样的降压回灌试验结果对比发现,初期当土体孔隙比较大时,渗透系数较大,且压缩模量较小,此时水容易排出,使得初期土样变形较大,渗透系数变化也较大;而过了一段时间后,由于孔隙比变小,渗透系数也随之减小,且压缩模量随之增大,此时变形的发展比较缓慢,土体压缩较小。

对比降压与回灌的试验结果也可以发现,回灌时孔隙比会增大,但是回灌时的渗透系数因堵塞效应反而呈现进一步降低的趋势,比降压时的渗透系数要小,因此相同孔压差条件下整个过程达到稳定所需要的时间比降压时要长。同时,回弹模量比压缩模量大,说明相同的孔压差情况下,回灌造成的回弹量要比降压造成的沉降量小。

将降压回灌模拟试验的试验结果进行处理,并将孔隙比随有效应力的变化关系图绘制在图6中。从图中可以看出,两次试验的结果处理得到的 $e - \lg P$ 曲线

都很接近。将两次试验的平均压缩指数与平均回弹指数列于表3,可见两试样的压缩指数与回弹指数均很接近。采用相同土样进行一维固结试验,测得压缩指数与回弹指数分别为0.365和0.087,与降压回灌试验所得的指数存在一定的差距,可见降压回灌对土体变形特性存在一定的影响,有待进一步的研究。

表3 压缩性指标对比

Table 3 Comparison of compressibility indices

参数	试样1	试样2	平均值
压缩指数 $C_c$	0.267	0.263	0.265
回弹指数 $C_e$	0.057	0.052	0.0545

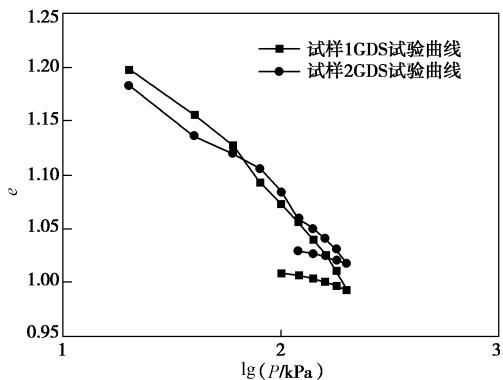


图6  $e - \lg P$  曲线图

Fig. 6 Curves of  $e - \lg P$

## 4 结论

通过采用GDS三轴试验仪对上海典型软黏土进行降压回灌室内模型试验,结合试验结果对试验数据进行了分析处理,研究了降压回灌的渗流作用对黏土渗透特性的影响规律,为上海典型软黏土的渗透特性研究提供了一种良好的试验方法。主要结论如下:

(1) 土体随着降压的进行而逐渐被压缩,孔隙比相应出现减小;回灌时,孔压逐渐增大,同时土样随着回灌的进行而出现了一定的回弹,孔隙比相应出现一定的增大。

(2) 降压时,在20~200 kPa有效应力作用下,土体渗透系数降低约3/4,且压缩模量会随着孔隙比的减小而增大,同时验证了渗透系数与孔隙比之间的非线性关系。

(3) 回灌时孔隙比会增大,同时,回弹模量出现相应增大,土体渗透系数因堵塞效应出现减小的趋势,且回灌时的渗透系数要比抽水时要小,可用 $e - \lg k$ 渗透关系对回灌时孔隙比与渗透系数之间的关系进行拟合。

(4) 土体变形特性在降压回灌作用下与一维固结作用下存在差异,可见降压回灌会对土体变形特性

产生影响, 有待进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 袁长青, 阚宏明, 唐益群. 上海地铁九号线宜山路站降水引起的沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 24(12): 1961 - 1968. (LUAN Chang-qing, KAN Hong-ming, TANG Yi-qun. Settlement caused by dewatering at Yishanlu Metro Station in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 24(12): 1961 - 1968. (in Chinese))
- [2] 刘婧, 陈锦剑, 王建华. 虹桥交通枢纽多级梯次降水流固耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 210 - 215. (LIU Jing, CHEN Jin-jian, WANG Jian-hua. Fluid-solid coupling analysis of multi-grade dewatering in Hongqiao transport hub[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 210 - 215. (in Chinese))
- [3] 郑刚, 曾超峰, 刘畅, 等. 天津首例基坑工程承压含水层回灌实测研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 491 - 495. (ZHEN Gang, ZENG Chao-feng, LIU Chang, et al. Field observation of artificial recharge of confined water in first excavation case in Tianjin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 491 - 495. (in Chinese))
- [4] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays. Part II: permeability characteristics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(4): 645 - 659.
- [5] NARASIMHARAJU P S R, PANDIAN N S, NAGARAJ T S. Determination of the coefficient of consolidation from independent measurement of permeability and compressibility[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 1997, 125(4): 224 - 229.
- [6] 谢康和, 齐添, 胡安峰, 等. 基于 GDS 的黏土非线性渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008(2): 420 - 424. (XIE Kang-he, QI Tian, HU An-feng, et al. Experimental study on nonlinear permeability characteristics of Xiaoshan clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(2): 420 - 424. (in Chinese))
- [7] 张明, 蒋敏敏, 赵有明. 基于 GDS 固结仪的吹填淤泥非线性渗透性及参数测定[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(3): 625 - 632. (ZHANG Ming, JIANG Min-min, ZHAO You-ming. Nonlinear permeability and parameter determination for dredged fill based on GDS consolidation apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(3): 625 - 632. (in Chinese))
- [8] 单蓓蓓, 郑西来, 乔振基, 等. 人工回灌过程中含水介质物理堵塞的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 10: 97 - 101. (SHAN Bei-bei, ZHENG Xi-lai, QIAO Zhen-ji, et al. Experimental study of aquifer physical clogging during artificial recharge process[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 10: 97 - 101. (in Chinese))
- [9] 张晓婉, 治雪艳, 杜新强, 等. 人工回灌地下水过程中微生物堵塞对介质渗透性影响的试验[J]. 安全与环境学报, 2014(3): 146 - 150. (ZHANG Xiao-wan, YE Xue-yan, DU Xin-qiang, et al. Experimental study of the effect of the microbial clogging on the porous media permeability during the artificial recharge[J]. Journal of Safety and Environment, 2014(3): 146 - 150. (in Chinese))
- [10] 何满潮, 刘斌, 姚磊华, 等. 地下热水回灌过程中渗透系数研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002(4): 374 - 377. (HE Man-chao, LIU Bin, YAO Lei-hua, et al. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002(4): 374 - 377. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)