

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0113

龙岩,雷晓辉,徐国宾,等.基于AHP灰色定权聚类的长距离输水工程闸门应急调控方式研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):184-188. LONG Y, LEI X H, QUAN J, et al. Study on emergency gate control in long distance water transfer project based on AHP Grey fixed weight clustering[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4):184-188. (in Chinese)

基于AHP-灰色定权聚类的长距离输水工程闸门 应急调控方式研究

龙岩^{1,2},雷晓辉¹,徐国宾²,权锦¹,李有明³

(1.中国水利水电科学研究院,北京100038; 2.天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津300072;
3.北京市勘察设计院有限公司,北京100038)

摘要:针对长距离输水工程,提出了应急调控过程中影响闸门调控效果的6项指标,包括调控时间、调控后污染范围、调控后污染物峰值浓度、调控成本、操作难易程度及调控对工程的影响;然后利用层次分析法建立和量化影响闸门调控效果的各项指标,并引入灰色定权聚类方法对闸门调控方式进行灰色分类,建立三角白化权函数,更能准确地确定闸门调控方式。最后以南水北调中线总干渠京石应急段起点至西黑山分水口之间的渠道为例,运用AHP-灰色定权聚类方法,确定了中线工程应急调控过程中较为合理的闸门调控方式为同步闭闸。

关键词:长距离输水工程;层次分析法;灰色定权聚类;白化权函数;闸门应急调控

中图分类号:TV133;X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1683(2018)04-0184-05

Study on emergency gate control in long distance water transfer project based on AHP Grey fixed weight clustering

LONG Yan^{1,2}, LEI Xiaohui¹, XU Guobin², QUAN Jin¹, LI Youming³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. BGI Engineering Consultants Ltd, Beijing 100038, China)

Abstract: For long distance water transfer projects, we proposed six indexes which affect the effects of gate control in emergency regulation. The six indexes include control time, sphere of pollution after control, peak concentration of pollutants after control, cost of control, difficulty level of control, and impact of control on the project. Then we used the analytic hierarchy process to establish and quantify these indexes, and adopted the gray fixed weight clustering method to conduct gray classification of the gate control modes. We established the triangular whitening weight function so as to determine the gate control mode more accurately. Finally, taking the channel from the start of the emergency section of the main canal of the Middle Route of South to North Water Transfer Project to the Xiheishan offtake as a case study, using the AHP grey fixed weight clustering method, we determined that synchronous gate closure is a more reasonable control mode in emergency regulation of the Middle Route project.

Key words: long distance water transfer project; analytic hierarchy process; grey fixed weight clustering; whitening weight function; emergency gate control

收稿日期:2017-10-09 修回日期:2018-04-24 网络出版时间:2018-05-18
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180516.0950.002.html>

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108)

Fund: Major Projects of Water Pollution Control and Management Technology(2017ZX07108)

作者简介:龙岩(1989),女,河北保定人,博士研究生,主要从事环境水力学研究。E-mail:450138331@qq.com

通讯作者:雷晓辉(1974),男,陕西澄城人,教授级高级工程师,博士,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:lxh@iwhr.com

由于我国水资源时空分布不均匀,使许多地区出现严重缺水现象,并且经济发展也受到制约,因此产生了调水需求^[1]。针对此问题,我国已建跨流域输水工程 20 余座,如南水北调工程^[2]、引滦入津工程、引黄济青、引松入长等。正是由于这些跨流域工程沿线有众多输水建筑物,易导致突发水污染事件发生^[3,4]。目前国内外学者对污染物输移扩散研究较多,如作者已经分析了同、异步闭闸调控方式下污染物输移扩散规律^[5],同时也对如何快速预测污染物扩散范围进行研究^[6],TANG 等^[7]对南水北调中线工程正常输水情况下污染物变化规律进行研究;但是一旦发生突发水污染事件,如果不能快速有效的确定闸门的调控方式,将会导致调控方案出现偏差,延误救援时机。许多学者也针对突发水污染事件提出了一些应急调控决策模型^[8,9],在这些模型中,闸门的调控方式是重要的组成要素,因此对长距离输水工程突发水污染事件闸门应急调控方式进行研究^[10],将有利于应急调控及应急处置。

闭闸调控方式的选取主要依赖于闸门调控效果和操作技术。不同输水工程的沿线建筑物、水力控制等条件不同,所选择的闸门调控方式的调控效果和操作技术水平相差很大。为了有效控制污染物扩散,减小经济损失,需根据输水工程的实际选取操作技术容易、调控效果最好的闭闸调控方式^[11]。因此为了针对不同的闭闸调控方式的优劣做出客观、定量的综合评价,文中引入了灰色白化权函数聚类分析方法。灰色白化权函数聚类又分为灰色变权聚类与灰色定权聚类两种方法,其中灰色变权聚类适合于指标的意义、量纲皆相同的情况;灰色定权聚类则适合于聚类指标的意义、量纲不同,并且不同指标的样本值在数量上相差较大的情况^[12,14]。而层次分析法(AHP)的多级分层结构体系^[15,17],将影响闭闸调控效果的多状态变量转换为单状态变量进行评估,使闭闸调控效果定位易于实现,同时能定量给出状态评估结果。因此,本文将 AHP 与灰色聚类分析相结合,确定长距离输水工程应急调控过程中闸门调控方式,并以南水北调中线京石应急段为例验证了此方法在长距离输水工程突发水污染事件应急调控过程中的科学有效性。

1 模型构建

模型的具体思路是根据决策者的判断信息,利用 AHP 确定各指标的权重,然后利用白化权函数进行灰色聚类,最后根据综合聚类系数,判断适用于长距离输水工程的闭闸调控方式。其具体步骤为:

第一步,利用 AHP 建立评估模型并确定各指标权重。首先建立指标的层次结构,然后需要根据各层次间、指标间的相对重要性赋予相应的权重。采用 Saaty 引用的 1-9 标度方法,对本层的指标以“相对重要性”的原则进行重要度赋值来建立判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ^[18,20],其中 a_{ij} 满足以下条件:

$$(1) a_{ij} > 0; (2) a_{ii} = 1; (3) a_{ij} = 1/a_{ji}。$$

为了验证各指标权重的有效性,需要对判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 按照式(1)进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 的最大特征根; n 为矩阵阶数; RI 为平均随机一致性指标。当 $CR < 0.1$ 时,建立的判断矩阵有效,否则需要重新建立判断矩阵,直到 $CR < 0.1$ 。判断矩阵建立后,采用和法原理求其权重:

$$\eta_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj}) \quad (2)$$

其中: a_{ij} 为第 j 列中的元素。

第二步,确定各灰类的三角白化权函数 f_{jk} ^[21,24]。

(1) 根据评估需求划分灰类数 s ,然后将每个指标的取值也对应划分成 s 个灰类。

(2) 算出属于的灰类 k 的隶属度 $f_{jk}(x)$ 。

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [a_{k-1}, a_{k+2}] \\ (x - a_{k-1}) / (\lambda - a_{k-1}), & x \in [a_{k-1}, \lambda] \\ (a_{k+2} - x) / (a_{k+2} - \lambda_k), & x \in [\lambda_k, a_{k+2}] \end{cases} \quad (3)$$

(3) 计算对象 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 关于灰类 k 的综合聚类系数 σ_i^k :

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j \quad (4)$$

式中: $f_j^k(x_{ij})$ 为 j 指标子类白化权函数; η_j 为指标 j 在综合聚类中的权重。

(4) 由式(5)判断对象 i 属于灰类 k^* ; 当有多个对象同属于 k^* 灰类时,还可根据综合聚类系数的大小确定同属 k^* 灰类各对象的优劣或位次。

$$\max_{k \in \{1, 2, \dots, s\}} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*} \quad (5)$$

2 案例分析

本文选取南水北调中线总干渠京石应急段起点至西黑山分水口之间的渠道为研究对象^[25]。具体说明了基于 AHP-三角白化权函数的灰色聚类综合评价方法与过程。

(1) 闭闸调控评估体系的确定。

闭闸调控方式分为同步闭闸调控、异步闭闸之

“上游先关闭”和异步闭闸之“下游先关闭”，这三种方法为聚类对象，取调控时间、调控后污染范围、调控后污染物峰值浓度、调控成本、操作难易程度及调控对工程影响为指标；按照好、较好、差三类进行分类。每个聚类对象关于各聚类指标的观测值矩阵为 $X = (x_{ij})_{3 \times 5}$ ，应急决策者需要根据观测值 x_{ij} 对相应的调控方式进行评估、判断，确定所属灰类，从而确定闭闸调控方式。影响闸门调控效果的因素很多，而且各因素的影响程度各不相同，因此，指标的选取原则是能直观地反映闸门调控效果。为了满足闭闸调控方式评估的需要，本文所建立的评估体系见图 1。

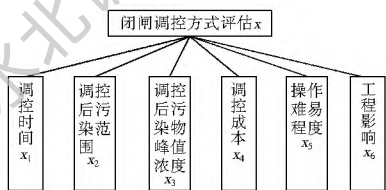


图 1 闭闸调控评估体系

Fig. 1 The assessment system of gate control

将各个指标得分转化为百分制，分为好、较好和差 3 个灰类，通过 AHP 方法对各项指标进行专家调查得到闭闸调控评估判断矩阵 A ，通过和法对矩阵 A 进行求解得到调控时间、调控后污染范围、调控后污染物峰值浓度、调控成本、操作难易程度及调控对工程影响的权重分别为 0.3536, 0.0636, 0.1944, 0.1645, 0.1201, 0.1038。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 3 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 2 & 1/2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 评价矩阵的建立。

本文假设南水北调中线总干渠京石应急段起点至西黑山分水口段发生突发水污染事件，事件发生后闸门进行紧急调控，对这 3 种闭闸调控方式进行评价研究，评分标准见表 1；其各指标实现值见表 2。

表 1 各指标评分标准

Tab. 1 Scoring criteria of each index

指标	100 分	70 分	40 分
调控时间	整体调控需很短时间	整体调控需要一段时间	整体调控需要很长时间
调控后污染范围 W	$W \leq 5$ km	$5 \text{ km} \leq W \leq 10$ km	$W \geq 10$ km
调控后污染物浓度 C	$C \leq$ 原浓度的 10%	原浓度的 10% $\leq C \leq$ 原浓度的 30%	$C \geq$ 原浓度的 30%
调控成本	低成本	中成本	高成本
操作难易程度	非常容易	比较容易	非常困难
调控时工程安全	工程没有受到破坏	工程受到一定破坏	工程受到严重破坏

表 2 闭闸调控评估各指标实现值

Tab. 2 The actual value of each index

指标	同步闭闸调控	异步闭闸之“上游先关闭”	异步闭闸之“下游先关闭”
调控时间	80	68	60
调控后污染范围	88	70	75
调控后污染物浓度	75	88	82
调控成本	82	75	70
操作难易程度	92	85	80
调控时工程安全问题	76	84	8

$a_4 = 85$ 分别表示指标 $j(j = 1, 2, \dots, 6)$ 属于好、较好、差三个灰类的中心值，考虑实际情况，指标数域的延拓值 $a_0 = 40, a_5 = 100$ ，而 $\lambda_1 = 60, \lambda_2 = 70, \lambda_3 = 80$ ；采用公式 (3)，可得三角白化权函数为：

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [40, 75] \\ (x - 40)/(60 - 40), & x \in [40, 60] \\ (75 - x)/(75 - 60), & x \in [60, 75] \end{cases} \quad (6)$$

$$f_j^2(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [55, 85] \\ (x - 55)/(70 - 55), & x \in [55, 70] \\ (85 - x)/(85 - 70), & x \in [70, 85] \end{cases} \quad (7)$$

$$f_j^3(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [65, 100] \\ (x - 65)/(80 - 65), & x \in [65, 80] \\ (100 - x)/(100 - 80), & x \in [80, 100] \end{cases} \quad (8)$$

表 3 各项指标等级划分标准

Tab. 3 Gradation criterion of each index

等级	差	较好	好
分数	$65 \geq X^1 \geq 55$	$75 \geq X^2 \geq 65$	$85 \geq X^3 \geq 75$

样本矩阵 $E = (x_{ij})_{3 \times 6}$ 为：

$$E = \begin{bmatrix} 80 & 88 & 75 & 82 & 92 & 76 \\ 68 & 70 & 88 & 75 & 85 & 84 \\ 60 & 75 & 82 & 70 & 80 & 88 \end{bmatrix}$$

(3) 三角白化权函数的建立。

将闭闸调控方式按照好、较好、差三类进行分类 (其划分标准见表 3)，取 $a_1 = 55, a_2 = 65, a_3 = 75$ ，

(4) 计算各指标综合聚类系数 ϕ_i 。

聚类系数的大小是衡量聚类对象属于某一灰类的

标准, 设 ϕ_i 为聚类对象 i 关于 k 灰类的聚类系数, 其计

算公式为式(4), 可计算各指标综合聚类系数, 见表 4。

表 4 闸门调控方式综合聚类评价结果

Tab. 4 The clustering results of gate control

调控方式	差	较好	好	ϕ_i^*	结果
同步闭闸	0	0.3426	0.7936	0.7936	好
异步闭闸之“上游先关闭”	0.2569	0.5026	0.4913	0.5026	较好
异步闭闸之“下游先关闭”	0.4721	0.4036	0.4546	0.4721	差

从表 4 中可以看出, 在长距离输水工程中, 同步闭闸调控属于“好”灰类, 异步闭闸之“上游先关闭”属于“较好”灰类, 而异步闭闸之“下游先关闭”属于“差”灰类, 说明在长距离输水工程应急调控中需同时关闭上下游节制闸。从实际情况来看, 对于多渠段的明渠输水工程, 异步闭闸可有效降低水位波动对渠道岸边的破坏, 但是闭闸调控的总时间过长, 这样一旦发生重大污染事故, 不利于污染物的控制; 并且同步闭闸调控较异步闭闸调控更能有效控制污染范围。因此, 在长距离输水工程应急调控过程中, 较为合理的闸门调控方式为同步闭闸, 这一结论与练继建^[3]等人提出的突发水污染事件下, 长距离明渠输水工程中控制污染范围的应急调控方式为同步闭闸调控方式是一致的。

3 结论

在长距离输水工程应急调控过程中, 考虑闸门调控方式对调控效果的影响, 提出了调控时间、调控后污染范围、调控后污染物峰值浓度、调控成本、操作难易程度及调控对工程影响等影响因素。利用 AHP 建立闭闸调控评估体系, 并通过构建三角白化权函数确定闸门的调控方式, 最后以南水北调中线京石应急段为例, 通过 AHP-灰色聚类分析, 得到在应急调控中需同时关闭上下游节制闸; 同时, 可将该闸门调控方法直接应用于调控系统中, 这样可以有效的控制污染物扩散, 降低污染事故影响。

参考文献(References):

[1] 张晨. 长距离输水工程安全研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2008. (ZHANG C. The safety research and application of long distance water conveyance project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))

[2] 张成, 李庆国, 钱俊. 大型输水渠道的区间调度方式研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 116-121. (ZHANG C, LI Q G, QIAN J. Study on partition schedule for large water transfer channel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 116-121. (in Chinese))

[3] 练继建, 王旭, 刘婵玉, 等. 长距离明渠输水工程突发水污染事

件的应急调控[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(1): 44-50. (LIAN J J, WANG X, LIU C Y, et al. Emergency regulation for sudden water pollution accidents of open channel in long distance water transfer project[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2013, 46(1): 44-50. (in Chinese))

[4] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 南水北调中线工程冰期输水特性研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1295-1301. (MU X P, CHEN W X, CUI W, et al. Study on the characteristics of flow in Middle Route of South to North Water Transfer Project during freezing period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1295-1301. (in Chinese))

[5] 龙岩, 徐国宾, 马超. 同、异步闭闸调控下污染物的输移扩散特征[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 709-714. (LONG Y, XU G B, MA C. Pollutant transport rules under synchronous control and asynchronous control[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2): 709-714. (in Chinese))

[6] 龙岩, 徐国宾, 马超, 等. 南水北调中线突发水污染事件的快速预测[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 883-889. (LONG Y, XU G B, MA C, et al. Study on the rapid prediction of sudden water pollution for South to North Water Transfer Project[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 883-889 (in Chinese))

[7] TANG C H, YI Y J, YANG Z F, et al. Water pollution risk simulation and prediction in the main canal of the South to North water transfer project[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2111-2120

[8] XU G B, LONG Y, MA C, et al. A real time, rapid emergency control model for sudden water pollution accident in long distance water transfer project[J]. Water Science and Technology: water supply, 2017, 1: 73-83.

[9] LONG Y, XU G B, MA C, et al. Emergency control system based on the analytical hierarchy process and coordinated development degree model for sudden water pollution accidents in the Middle Route of the South to North Water Transfer Project in China[J]. Environ Sci Pollut Res, 2016, 23: 12332-12342.

[10] 方神光, 吴保生, 傅旭东. 南水北调中线干渠闸门调度运行方式探讨[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 93-97. (FANG S G, WU B S, FU X D. Gate operation in the middle route of the South to North Water Diversion Channel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5): 93-97. (in Chinese))

- [11] 杨敏,周芳. 节制闸联合调度控制下明渠输水系统水力控制研究[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(2): 202-205. (YANG M, ZHOU F. A study of hydraulic control of the open channel water diversion system under combined control of all check sluices[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(2): 202-205(in Chinese))
- [12] 刘金平,姬长生,李辉. 定权灰色聚类分析在采煤方法评价中的应用[J]. 煤炭学报, 2001(5): 493-495. (LIU J P, JI C S, LI H. Evaluation of coal mining methods with weighted gray clustering analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2001(5): 493-495. (in Chinese))
- [13] 刘思峰,党耀国,等. 灰色系统理论及其应用(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (LIU S F, DANG Y G, et al. Cybernetics and systems[M]. Beijing, Science press. (in Chinese))
- [14] SHAO M L, GONG Z W, XU X X. Risk assessment of rain storm and flood disasters in China between 2004 and 2009 based on gray fixed weight cluster analysis[J]. Natural Hazards, 2014, 71: 1025-1052.
- [15] 钟登华,蔡绍宽,李玉钦. 基于网络分析法(ANP)的水电工程风险分析及其应用[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 11-17. (ZHONG D H, CAI S K, LI Y Q. Risk analysis of hydropower project based on analytic network process and its application[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 11-17. (in Chinese))
- [16] 马跃先,王梁,原文林,等. 基于模糊层次分析的水轮机选型研究及应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 261-265. (MA Y X, WANG L, YUAN W L, et al. Study on selection of water turbine type based on fuzzy AHP and its application[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 261-265. (in Chinese))
- [17] 刘从法,罗日成,雷春燕,等. 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J]. 2013, 33(6): 104-107. (LIU C F, LUO R C, LEI C Y, et al. Power transformer condition assessment based on AHP grey fixed weight clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 104-107. (in Chinese))
- [18] 孙海涛,熊鹰,谢海燕,等. 层次分析法在潜艇总体性能评估中的应用与改进[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(6): 38-47. (SUN H T, XIONG Y, XIE H Y, et al. Analytic hierarchy process in the assessment of submarine overall performance [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(6): 38-47. (in Chinese))
- [19] 赵云飞,陈金富. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 85-89. (ZHAO Y F, CHEN J F. Analytic Hierarchy Process and It's Application in Power System[J]. North China Electric Power, 2004, 24(9): 85-89. (in Chinese))
- [20] 马迪,刘学毅,王顺洪. 基于层次分析法的高速铁路轨道综合评价[J]. 路基工程, 2010, 151(6): 6-8. (MA D, LIU X Y, WANG H S. Comprehensive evaluation of high speed railway track based on analytic hierarchy process[J]. Subgrade Engineering, 2010, 151(6): 6-8. (in Chinese))
- [21] 吴凤平,程铁军. 基于改进的灰色定权聚类分析的突发事件分级研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21: 110-113. (WU F P, CHENG T J. The classification of emergency based on improved gray clustering model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21: 110-113. (in Chinese))
- [22] 刘思峰,谢乃明. 基于改进三角白化权函数的灰评估新方法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 244-249. (LIU S F, XIE N M. New gray evaluation method based on reformative triangular whitenization weight function[J]. Journal of systems engineering, 2011, 26(2): 244-249. (in Chinese))
- [23] 王化中,强凤娇,贺宝成. 基于改进的中心点三角白化权函数灰评估新方法[J]. 统计与决策, 2014(8): 69-72. (WANG H Z, QIANG F J, HE B C. New gray evaluation method based on center of reformative triangular whitenization weight function[J]. Statistics and Decision, 2014(8): 69-72. (in Chinese))
- [24] 刘学武. 灰色定权聚类在生态移民无土安置区适宜性评估中的应用[J]. 国土资源科技管理, 2015, 32(4): 16-22. (LIU X W. Application of the grey fixed weight clustering for suitability evaluation in non farmland resettlement area for eco migration[J]. Scientific and technological management of land and resources, 2015, 32(4): 16-22. (in Chinese))
- [25] 朱德军. 南水北调中线明渠段事故污染特性模拟方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2007. (ZHU D J. Study on numerical methods for water pollution accidents in the middle route open channel of the South to North water transfer[D]. Beijing, Tsinghua University. (in Chinese))