印度洋北部海域垂直剖面温度结构的参数模型

霍文娟¹ 韩 震¹²

(1.上海海洋大学 海洋科学学院,上海 201306;2.大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室,上海 201306)

摘 要:针对印度洋北部海域海水温度结构特征 利用 2010 年 ARGO 剖面温度数据进行了海水温度垂直剖面结构特征分析 及参数模型研究。印度洋北部海域海水呈现稳定的三层结构 即混合层、温跃层和深层 本文将该海域垂直剖面温度结构表 达为5个参数组成的参数模型 5个参数分别为海表面温度、混合层深度、温跃层深度、跃层底部温度和温跃层强度。为了检 验参数化模型的反演效果 我们以 2010 年为例 进行了印度洋北部海域的垂直剖面温度反演 ,并将反演结果与 ARGO 实测 数据进行对比分析 剖面温度的总体均方根误差为 0.510 8 ℃。

关键词:印度洋;垂直剖面;温度;ARGO;参数模型 中图分类号:X87 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2013)03-0368-05

Parametric model of seawater temperature profile in the Northern Indian Ocean

HUO Wen-juan 1 ,HAN Zhen $^{1\,2}$

(1. College of Marine Sciences Shanghai Ocean University Shanghai 201306 , China; 2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources , Ministry of Education , Shanghai 201306 , China)

Abstract: In this paper according to the structural features of seawater temperature in the northern Indian Ocean , we analyzed seawater temperature vertical profile structural characteristics and then developed a parametric model using the temperature data of the 2010 ARGO profiles. It is a steady three-tier structure in the northern Indian Ocean , the mixed layer , thermocline and deep layer. In this paper, based on those layered structure of temperature fields , the parametric model of seawater vertical profile include five parameters: sea surface temperature , mixed layer depth , thermocline bottom depth , thermocline bottom temperature , thermocline temperature gradient. In order to verify the parametric model inversion accuracy , we took 2010 as an example , the inversion results were compared with the corresponding observed temperature profiles of the northern Indian Ocean , the root mean square error is 0.510 8 °C. Key words: the Indian Ocean; vertical profile; temperature; ARGO; parametric model

海水温度的垂直剖面是海洋科学领域主要研究内容 之一。掌握海水温度场的空间结构及其分布,对于海洋 环境监测、渔情预报等具有重要的意义。Chu^[1]等在1997 年基于温度场分层结构的热量参数模型分析了黄海的热 量变化;而后,在2000年,他在现场观测海水温度剖面统 计分析的基础上,提出了一个由表层水温反演水温垂直 剖面的参数化模型^[2]。2007年,Cesar Gonzalez-Pola^[3]等 假设稳定的温跃层和季节性变化的温跃层能够分别近似 为稳态和扰动扩散过程的瞬态,并且混合层在外力的作 用下急剧前进,在此假设的基础上,他们提出用理想函数 法来描述海洋上层温度结构特征,并以 Biscay 湾南部海 域为实验区,采用水文站提供的时间序列的月平均 CTD 剖面温度数据对该算法进行验证。同年,James M. Wilczak^[4]等利用 AXBT (Airborne Expendable Bathythermographs)和卫星高度计数据分析了在 1997~1998 年的厄 尔尼诺事件期间,美国西海岸海表温度异常模式以及上 层海洋的温度结构和热容量的变化,结果表明在 1997~ 1998 年的厄尔尼诺事件期间,混合层的深度比常态时增 加 30%~50%,最大的温度异常值出现在温跃层 100 m 左右,利用 AXBT 数据和卫星高度计数据的实验结果具有

收稿日期:2012-06-07,修订日期:2012-09-18 基金项目:国家发改委高技术产业化示范工程项目(2009214) 作者简介:霍文娟(1985-),女,河北张家口人,硕士研究生,主要从事海洋遥感研究,E-mail:huowenjuan1985@126.com 通讯作者:韩 震(1969-),男山东德州人,博士,教授,E-mail:zhhan@shou.edu.cn 较高的一致性。2009 年,修树孟^[5]等利用黄海水温垂直 剖面分层结构的参数化方法和统计分析 ,采用特征参数 的多时间尺度反演方法,建立了一个利用卫星遥感 SST 反演黄海夏季水温垂直剖面的参数化模式,与实测剖面 对比,水温垂向剖面的平均误差为0.90℃。综上所述, 考虑到海洋表层信息与次表层信息之间的物理关系、数 学统计关系 从海洋表面温度出发通过建立海洋模型来 反演海水垂直剖面温度,是获取大范围同步海洋温度数 据的有效方法。目前,关于海洋垂直剖面温度模型多是 统计模型,其适用范围受到海水剖面温度结构的限制。 本文在前人研究的基础上,针对印度洋北部海域海水温 度结构特征,利用 ARGO(array for real-time geostrophic oceanography) 剖面温度数据进行海水温度垂直剖面结构特 征分析及参数模型研究,并利用卫星遥感海表温度数据 进行海水垂直剖面温度的计算,从而为印度洋北部海洋 温度调查提供了参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文所用 ARGO 数据来自于全球海洋数据同化实验 室(Global Ocean Data Assimilation Experiment) (http:// www.usgodae.org/) 发布的 ARGO 剖面温度数据。2010 年 目标研究区的 ARGO 数据分布见图 1,共 2909 个数据点, 随机选出 2000 个数据点用于模型建立,其余 909 个用于 精度验证。





Fig. 1 Study area and distribution of ARGO data

卫星遥感 SST 数据来自于 NASA 官方网站海色数据 中心(http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/)发布的 MODIS 海 表面温度三级产品 其空间分辨率为 4.63 km × 4.63 km。 对获取的卫星遥感海表温度数据预处理包括辐射校正和 空间几何校正。

1.2 方 法

1.2.1 印度洋北部海域垂直剖面温度结构特征

位于海洋表面之下的水体温度结构一般可以划分为 3 层 其中 温度梯度最大的水体称为温跃层 在中低纬度 地区 永久性温跃层一般出现在 200 至 1 000 m 之间^[6]。 本文的研究区域为(0°N ~ 30°N 40°E ~ 100°E),其海水 温度结构符合低纬度海区温度典型垂直分布特征。我们 利用 ARGO 数据,通过绘制温-压图来观察该区域水温垂 直剖面结构,发现该研究区域海水温度在 2010 年全年总 体呈现稳定的 3 层结构,即混合层、温跃层(上层水体)和 深层,其典型结构如图 2 所示。我们以大洋温跃层强度 △T/△Z 最低标准值为 0.05 ℃/m 作为临界值^[7]来判定 混合层深度、温跃层上界、温跃层下界。发现在该研究区 域混合层深度在秋冬季比春夏季大,并具有半年周期性, 这与孙振宇等^[8]关于印度洋混合层深度季节变化研究结 果是一致的;跃层深度在夏冬季大约在 50~100 m 之间, 部分海域的温跃层存在季节性的逆温,如阿拉伯海的逆 温层始于 11 月、在 1 月中旬达到最大值,并在次年 3 月消 失^[940];在 200 m 以下的整个热带印度洋温度梯度随深度 增加而减小^[11]。



图 2 印度洋北部海域垂直剖面温度结构

Fig. 2 Vertical profile temperature in the Northern Indian Ocean 图中: T_s为海洋表层温度; h₁ h₂分别为混合层厚度(温跃层 上界)和温跃层下界深度。

1.2.2 海水垂直剖面温度结构的参数模型

为了更好地对印度洋北部海域垂直剖面温度进行定 量分析,我们用参数模型的方法对其垂直剖面温度结构 进行了研究^[2-3]。图2所示的垂直剖面温度结构参数模 型由混合层、温跃层和深层三部分组成。混合层近似为 稳态结构 温度近似等于海洋表面温度;温跃层表达为温 跃层顶部温度、温度梯度和深度的函数;深层成层的衰减 特性用 *e* 指数函数来表达。模型表达式如下,

$$\begin{cases} T(z) = T_s & 0 \le z < h_1 \\ T(z) = T_s + G_{th}(z - h_1) & h_1 \le z < h_2 \\ T(z) = c_1 \exp(c_2 z) + c_3 \exp(c_4 z) & z > h_2 \end{cases}$$
(1)

其中: G_{th} 为温跃层强度; $c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4$ 为非线性曲线拟 合系数; $G_{th} = (T_{h_2} - T_{h_1}) / (h_2 - h_1) , T_{h_1}$ 为温跃层上界处温 度 T_{h_2} 为温跃层下界处温度。

在模型中,温跃层的特征由线性方程来描述,而温跃 层以下的深层则是非线性方程,为了保证模型所描述的 温度剖面结构的连续性,在温跃层下界面处,该模型应满 足以下边界条件,即在 h₂的左右无穷小领域内,函数 T(z) 的导数相等并等于 G_{th},且 T(z) 在 h₂处的值相等;

$$\begin{cases} \frac{dT(z)}{dz} \Big|_{h_2 + 0} = \frac{dT(z)}{dz} \Big|_{h_2 - 0} = G_{ih} \\ T(h_2 + 0) = T(h_2 - 0) \end{cases}$$
(2)
参数模型(1) 中的五个参数在时间尺度上存在一定

的差异,一般来讲, T_{h_2} , h_2 和 G_{th} 的时间尺度较长(月或 季),对于长时间尺度参数,可以作为背景值,由历史数据 统计预测得到; T_i 和 h_1 的时间尺度较短(小时或天),两 者具有较高的相关性,如果 T_i 由卫星遥感数据反演得到, 那么,利用方程(3)可得到 h_1 ,然后利用方程(1)得到整 个海水温度剖面结构。

$$h_1 = h_2 - [T_{h_2} - T_s] / G_{th}$$
(3)

对于印度洋北部海域,*T_s* 与 *T_{h2}*,*h*1</sub>,*h2*,*G_{th}*之间的相 关系数分别为-0.01,-0.7917,-0.0012和0.083,可见,*T_s* 与 h_1 之间的负相关性远高于其他参数,跃层强度 G_{th} 和温 跃层底部温度 T_{h_2} 具有明显的月或季节性变化特征,而跃 层深度 h_2 则具有半年周期特征,可见在该研究区域, T_{h_2} , h_2 G_{th} 的时间尺度远远大于 T_s 和 h_1 ,因此在本研究中可 以将 T_{h_2} h_2 G_{th} 作为背景输入值,由历史数据提前获取。

对于深层海水温度结构的 e 指数方程 我们采用 AR-GO 数据利用 Matlab 非线性拟合来获得方程系数 2010 年 1 月、4 月、7 月、10 月印度洋北部海域垂直剖面温度反演 算法的系数(r) 如表 1 所示。

表1 印度洋北部海域垂直剖面温度反演算法的系数 Tab.1 Coefficients in the inversion algorithm of temperature profile in the Northern Indian Ocean

	r				
Б Л [В]	C ₁	C ₂	C ₃	C_4	
2010-01	16.37	-0.000 834 8	53.01	-0.020 36	
2010-04	-2.405	4.193	9.597	-0.745 9	
2010-07	-0.000 8	-0.122 3	16.867 6	-0.000 9	
2010-10	102.3	-0.025 28	15.8	-0.000 805 7	

2 结果与讨论

为了检验参数化模型的反演效果,我们将 2010 年温 跃层深度 h_2 、温跃层强度 G_{th} 和跃层底部温度 T_{h_2} 在1月、4 月、7月和 10月的月平均值作为背景输入值,卫星遥感数 据 MODIS SST 作为独立参数,通过参数模型(1)和(3)反 演得到印度洋北部海域的垂直剖面温度。图 3~图 10分 别为试验区印度洋北部海域在 2010 年 1月、4 月、7 月和 10月反演垂直剖面温度与 ARGO 实测剖面温度对比结 果。



图 3 2010 年 1 月 18 日 [69.537°E 6.87°N] 处剖面温度 Fig. 3 Temperature profile at [69.537°E 6.87°N] January 18 2010

由反演垂直剖面温度与 ARGO 实测垂直剖面温度的 对比图中,发现1月8日和18日的均方根误差分别为 0.6128℃和0.6152℃,最大相对误差位于温跃层(图 3、图4);4月2日和29日的均方根误差分别为0.5970 ℃和0.4866℃,位于深度600m以上的海水温度反演误

图 4 2010 年 1 月 28 日 [69.549°E,6.596°N] 处剖面温度

Fig. 4 Temperature profile at [69.549 °E,6.596 °N], January 28,2010

图 5 2010 年 4 月 2 日 [63.696°E,6.194°N] 处剖面温度 Fig. 5 Temperature profile at [63.696°E,6.194°N], April 2,2010

图 6 2010 年 4 月 29 日 [70.362°E, 6.195°N] 处剖面温 度

Fig. 6 Temperature profile at [70. 362 °E,6. 195 °N], April 29,2010

图 8 2010 年 7 月 3 日 [81.7°E,10.214°N] 处剖面温度 Fig. 8 Temperature profile at [81.7°E,10.214°N], July 3, 2010

差较大(图5、图6);7月1日和3日的均方根误差分别为 0.2566℃和0.4137℃,其温跃层海水温度反演精度的 提高使得整个剖面的均方根误差较小(图7、图8);10月

- 图 9 2010 年 10 月 6 日 [70.892°E,5.626°N] 处剖面温 度
- Fig. 9 Temperature profile at [70.892 °E,5.626 °N], October 6,2010

图 10 2010 年 10 月 28 日 [87.033°E,15.653°N] 处剖面 温度

Fig. 10 Temperature profile at [87.033 °E,15.653 °N], October 28,2010

6 日和 28 日的均方根误差分别为 0. 339 3 ℃ 和 0. 350 0 ℃ ,反演剖面温度结构与实测结果具有较好的一致性 ,混 合层和温跃层的相对误差较大(图 9、图 10)。

从 2010 年 1 月、4 月、7 月、10 月反演结果分析,在混 合层区域 A月均存在 1~2 ℃的热偏差,这是由于在计 算过程中,将混合层的温度近似等于海洋表面温度,而本 文所用海表面温度由遥感技术测得,仅是海洋皮层温度, 这与 ARGO 浮标测得的海表温度有着很大的差异。同 时,ARGO 浮标的自由漂移特性使得其在测量海水剖面温 度的过程中受到海洋动力过程的影响,因此,在海洋活动 频繁的上层海洋(混合层和温跃层)中,通过模型反演的 剖面温度与 ARGO 实测剖面温度的一致性不如深层海 水。

通过与全球海洋数据同化实验室(Global Ocean Data Assimilation Experiment)(http://www.usgodae.org/)发布的ARGO 实测数据对比分析,该算法的总体反演精度为

0.510 8(表2、表3) 比修树孟等人2007年在黄海的反演 精度(0.90 ℃)有一定的提高。综上所述,利用本文提出 的参数模型对印度洋北部海域垂直剖面温度进行计算, 无论混合层、温跃层还是深层,反演结果基本符合印度洋 北部海域海水温度剖面分布特点。 高于混合层和深层水体,这是由于温跃层复杂的海洋物 理活动将影响该层温度特征,简单的线性描述不足以表 达温度变化,这一问题将在下一步研究中探讨。此外,印 度洋北部的部分海域在混合层出现逆温亦是影响该层反 演精度的因素之一^[10]。

由表2和表3可以看出 温跃层的均方根误差总体要

	<u>ن</u> ــــــــــــــــــــــــــــــــــــ	<i>RMSE</i> /℃		
日期	112直	$H < h_1$	$h_1\!\leqslant\! H\!\leqslant\! h_2$	$H > h_2$
2010-01-03	[48.69 2.327]	0.4095	1.4558	0.5260
2010-01-07	[65.033 8.786]	0.0554	0.9074	0.3449
2010-01-08	[69.467 7.252]	0.0081	1.7219	0.1084
2010-01-17	[64.752 8.843]	0.0508	0.6872	0.2275
2010-01-22	[63.153 6.471]	0.5185	0.5049	0.2151
2010-01-23	[62.798,15.148]	0.0697	0.4345	0.5950
2010-01-24	[49.5 ,1.271]	0.4201	0.6439	0.4672
2010-01-28	[69.549 <i>b</i> .596]	0.2325	1.8737	0.1032
2010-01-28	[66.267 <i>b</i> .448]	0.0281	1.2086	0.2028
2010-04-20	[88.494 4.154]	0.0981	1.2938	0.5268
2010-04-22	[68.35,10.012]	0.5607	1.1814	0.2080
2010-04-24	[85.927 9.369]	0.4677	1.1080	0.3425
2010-04-27	[61.293 8.675]	0.9819	0.8358	0.3363
2010-04-28	[54.976 3.082]	0.1298	0.6434	0.5490
2010-04-29	[70.362 6.195]	0.0465	1.0423	0.3711
2010-04-30	[88.848 4.163]	0.0898	0.4759	0.4509
2010-04-04	[56.152 3.277]	0.1456	1.1325	0.4812
2010-04-05	[46.024 p.215]	0.2656	1.0410	0.2775
2010-04-24	[81.517 ,13.644]	0.0824	1.1750	0.1852
2010-04-29	[50,928 3,718]	0.0887	0.6754	0.4338

表 2 剖面温度实测值与模型计算值比较(1月和4月) Tab. 2 Comparison between observed and inverted temperature profiles (January and April)

Tab. 3 Comparison between observed and inverted temperature profiles (July and October)

	公 署	<i>RMSE</i> / °C		
다 別	12.直	$z < h_1$	$h_1\!\leqslant\!\!z\!\leqslant\!\!h_2$	$z > h_2$
2010-07-01	[64.33 <i>A</i> .618]	0.0116	0.5186	0.2395
2010-07-03	[81.7,10.214]	0.0256	0.8045	0.4111
2010-07-05	[87.032 2.906]	0.0491	0.5352	0.3780
2010-07-10	[89.331 3.514]	0.0315	0.8509	0.5098
2010-07-13	[81.393 9.66]	0.1131	1.0831	0.5387
2010-07-20	[90.388 p.111]	0.0369	2.1203	0.3384
2010-07-22	[81.262 2.713]	0.0999	0.8195	0.3935
2010-07-26	[88.434 3.106]	0.0036	1.4690	0.3094
2010-07-31	[63.955 4.526]	0.1992	1.0800	0.2034
2010-07-05	[68.446 9.175]	0.0443	0.9218	0.2312
2010-10-06	[70.892 5.626]	0.0046	0.7488	0.2646
2010-10-26	[80.871 2.756]	0.0129	1.0483	0.2372
2010-10-28	[87.033 ,15.653]	0.0758	0.5619	0.4122
2010-10-07	[62.805 3.374]	0.0316	0.7744	0.2382
2010-10-09	[61.775 4.445]	0.0161	0.8214	0.3933
2010-10-15	[85.617 4.145]	0.7453	0.8189	0.3184
2010-10-16	[90.915 9.505]	0.0582	0.5314	0.3814
2010-10-17	[62.448 3.441]	0.3215	0.9376	0.4996
2010-10-18	[87.502 3.581]	0.0371	1.375	0.1766
2010-10-19	[83.948,10.805]	0.8489	0.8671	0.2917

注: $H < h_1$: 混合层; $h_1 \leq H \leq h_2$: 温跃层; $H > h_2$: 深层。

1 月、4 月、7 月和 10 月的平均 RMSE 分别为 0.531 3 ℃、0.542 1 ℃、0.479 0 ℃和 0.490 7 ℃; 2010 年总平均 RMSE 为 0.510 8 ℃。

(下转第380页)

diatoms in chemostats under silicate or ammonium limitation. III. Cellular chemical composition and morphology of three diatoms [J]. Marine Biology ,1977 43: 19-31.

- [44] BROWN E J ,BUTTON D K. Phosphate-limited growth kinetics of Selanastrum capricornutum (Chlorophyceae) [J]. Journal of Phycology ,1979 ,15: 305-311.
- [45] PERRY M J , EPPLEY R E. Phosphate uptake by phytoplankton in the central North Pacific Ocean [J]. Deep-Sea Research , 1981 28:39-49.
- [46] GOLDMAN J C ,GILBERT P M. Kinetics of inorganic nitrogen uptake by phytoplankton [C]//Nitrogen in Marine Environments. New York: Academic Press ,1983: 223-274.
- [47] NELSON D M ,BRZEZINSKI M A. Kinetics of silicic acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf Stream warmcore rings [J]. Mar Ecol Prog Ser ,1990 62: 283-292.
- [48] JUSTIC D ,RABALAIS N N ,TURNER R E ,et al. Changes in

(上接第 372 页)

3 结 论

本文利用 2010 年 ARGO 剖面温度数据分析了印度 洋北部海域海水剖面温度特征,并从海表温度出发反演 得到了该海域的垂直剖面温度。印度洋北部海域海水温 度在 2010 年全年总体呈现稳定的三层结构 即混合层、温 跃层和深层;为了更好地对印度洋北部海域垂直剖面温 度进行定量分析,我们将该海水垂直剖面温度结构表达 为两个温度参数(海表面温度和跃层底部温度)、两个深 度参数(混合层深度、温跃层深度)和温跃层强度的参数 模型;在去相关分析的基础上,应用该海水剖面温度模型 计算了印度洋北部海域海水剖面温度,与ARGO实测数 据对比分析 剖面温度总体均方根误差为 0.510 8 ℃ ,反 演结果基本符合印度洋北部海域海水温度场分布特征, 但是,在海洋活动频繁的上层海洋(混合层和温跃层)中, 通过模型反演的剖面温度与 ARGO 实测剖面温度的一致 性不如深层海水。此外,温跃层的反演精度要低于混合 层和深层水体 这是由于温跃层复杂的海洋物理活动将 影响该层温度特征,简单的线性描述不足以表达温度变 化 这一问题将在下一步研究中探讨。

参考文献:

 CHU P C ,FRALICK C R Jr ,HAEGER S D ,et al. A parametric model for the Yellow Sea thermal variability [J]. Journal of Geophysical Research ,1997 ,102:10499-10507. nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine Coastal Shelf Science ,1995 40: 339-356.

- [49] BOLIN B ,ROHDE H. A note of the concepts of age distribution and transmit time in natural reservoirs [J]. Tell us ,1973 ,25 (2):58-62.
- [50] PRANDLE D. A modelling study of the mixing of ¹³⁷Cs in the seas of the European Continental Shelf [M]. London: Phil Trans Royal Soc ,1984: 407-436.
- [51] TAKEOKA H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea [J]. Continental Shelf Research , 1984 3: 331-336.
- [52] LUFF R ,POHLMANN T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a Eulerian dispersion model using a halflife time approach [J]. Dtsch Hydrogr Z ,1996 ,47 (4): 287– 299.
- [2] CHU P C ,FAN C W ,LIU W T. Determination of Vertical Thermal Structure from Sea Surface Temperature [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 2000 ,17:971-979.
- [3] GONZALEZ-POLA C ,FERNANDEZ-DIAZB J M ,LAVINC A. Vertical structure of the upper ocean from profiles fitted to physically consistent functional forms [J]. Deep-Sea Research I , 2007 54: 1985-2004.
- [4] WILCZAK J M ,LEBEN R ,MCCOLLUM D S. Upper-ocean thermal structure and heat content off the US West Coast during the 1997-1998 El Niño event based on AXBT and satellite altimetry data [J]. Progress in Oceanography 2007 74:48-70.
- [5] 修树孟 涨 钦 逄爱梅. 卫星遥感 SST 反演海水温度垂直剖 面的方法研究[J]. 遥感应用 2009 5:73-75.
- [6] PICKARD G L , EMERY J. Descriptive Physical Oceanography [M]. Great Britain: Antony Rowe Ltd ,1990: 40-42.
- [7] 张学宏,张绪东,李颜.海洋温跃层特征值的分析与计算 [J].海洋预报 2011 28(5):70-75.
- [8] 孙振宇,刘琳,于卫东.基于 ARGO 浮标的热带印度洋混合 层深度季节变化研究[J].海洋科学进展 2007 25(3):280-287.
- [9] 王彦磊 黃 兵 涨 韧 為.基于 ARGO 资料的世界大洋温度跃 层的分布特征[J].海洋科学进展 2008 26(4):428-435.
- [10] GNANASEELAN B T C SALVEKAR P S. Seasonal evolution of temperature inversions in the north Indian Ocean [J]. Current Science 2006 90(3):697-704.
- [11] 孙莎莎 胡瑞金. 基于 ARGO 的热带印度洋上层海温研究 [J]. 中国海洋大学学报 2010 40(9):15-23.