

92, 10(1) 黄海, 渤海, 海底, 温度, 盐度, 平均值
 1-7 黄渤海底层温、盐度与其垂直平均值
 的统计关系 P731.11

王宗山 徐伯昌[✓] 邹城梅 龚滨 李繁华 孙卫阳

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

摘 要

文中根据黄渤海区 1959~1982 年间水温和盐度垂向剖面历史资料, 建立了在给定水深下底层温、盐度与其对应的垂向平均值间的线性关系, 进而对所获得的系数建立其与水深和时间(月份)间非线性关系, 最终发展了底层温、盐度与其平均值、水深和时间的普适经验关系式 $T_b(S_b) = f(T_a(S_a), H, t)$, 为建立避开来自海面的热量、质量和动量在垂向上分配的复杂过程的简易底层温、盐度二维数值预报模式奠定基础。

关键词: 统计关系 热传输 动量

一、前 言

从海洋观测和研究成果已表明: 在黄海区底层于暖半年存在一冷水团, 它的特征主要为低温并伴以高盐; 在渤海以及黄海近岸较浅的水域, 虽不属冷水团的盘据区, 但却多为渔场捕捞和养殖区。近年来的调访表明, 底层冷水的移动已经给辽宁省和山东省的重要养殖基地(长海县和长岛县)的海珍动物带来严重乃至毁灭性冷害, 造成巨大经济损失; 另一方面, 从海洋捕捞的现状来看, 由于种种原因, 多年来我国的渔获量, 尤其是中、表层渔获量大幅度降低, 而目前的渔获量, 主要(50%~75%)是来自底层鱼类。这种现实迫切要求我们去解决底层的渔情预报(当然, 这比表层的困难得多)问题, 从而作为渔情预报重要因子的底层温度和盐度的预报, 就成为急待解决的新课题。因此, 底层温、盐的预报, 不管在物理海洋学本身还是在实际应用方面均具有重要的意义。

然而, 关于涉及到底层温、盐度的理论计算和预报的研究, 到目前为止还是较少的。从已查阅的文献看, Murakami 等(1985)曾提出过温、盐结构三维模式^[8], 王宗山等(1991)^[1]、孙卫阳等¹⁾及金梅兵等²⁾曾通过温、盐垂直剖面相似函数分别提出了描述温、盐三维结构的准三维模式, Omsteds(1983)和 Malkki 等(1985)及王宗山等(1991)分别根据原始方程及温度垂直剖面相似函数, 建立了一维温、盐^[9]和一维温度垂直结构^[10, 2]模式, Stigebrandt(1981)、王宗山等(1986)及万邦君(1990)等还通过不同途径提出了给出海洋热结构平均特征的模式^[11, 3, 4]。这些模式, 虽然能够给出底层温度(或平均值)或底层温、盐预报值, 但

• 本研究由山东省科委及山东省科学基金委员会资助。

1) 孙卫阳、王宗山: 黄渤海盐度数值预报的准三维模式。

2) 金梅兵、王宗山: 黄渤海温度三维数值预报模式。

本文于 1991 年 6 月 7 日收到, 修改稿于 1991 年 9 月 28 日收到。

对于用于底层温、盐数值预报而言,似乎过繁,给应用带来一定困难。此外,国内水产方面的学者,曾对于某些渔场区的底层盐度通过经验正交途径,建立底层盐度场与其影响因子间的经验预报关系^[5-7],给底层渔情预报增添了新因子,起到了推动生产的作用。但是,由于方法本身的局限性以及预报时需要获取众多的影响因子场资料,故使其推广应用存在一定不便。本文的目的是,为最终建立一种简便而易推广的、避开来自海面的热量、动量、质量在海洋垂向分配的复杂物理过程的模式^[1,4]寻求底层温、盐与其垂向平均值及水深和时间的经验关系。

二、底层温度的经验关系

气象资料的统计分析表明,其极值与对应的平均值之间存在相关性。那么,海洋的底层水温与垂直水柱的平均温度是否也存在类似的相关关系?为此,我们先从理论上进行分析。如众所周知,通常的热传导方程可表示为下面形式:

$$T_t + uT_x + vT_y + wT_z - A_T \nabla^2 T = -(\overline{WT}) + R, \quad (1)$$

式中, T 为水温; u, v, w 分别为 x, y, z 方向上流速分量; $\overline{WT}$ 为平均垂直涡动热通量; R 为太阳辐射的透射分量; ∇^2 为拉氏算子; A_T 为水平涡动导热系数; 下标 t, x, y, z 分别表示对应的偏导数。如果在黄渤海区一级近似认为 u 和 v 与 z 无关,并将温度垂直剖面取为下面形式^[1,2,10,22]:

$$T = \begin{cases} T_s & 0 \leq z \leq h \\ T_s - \theta_T(T_s - T_H), & h < z \leq H \end{cases} \quad (2)$$

和

$$K_T = \int_0^z \theta_T(\eta) d\eta, \quad (3)$$

式中, T_s 为上均匀(或表)层温度; T_H 为底层水温; h 为上均匀层厚度; H 为水深; $\theta_T(\eta)$ 为水温垂直剖面相似函数; η 为无维深度。则在假定来自太阳的辐射能完全被很薄的海表层所吸收以及海面 and 海底处 $W|_0 = W|_H = 0$ 的情况下,从 0 到 H 积分式(1)得:

$$T_A = T_H + [(1 - K_T) + K_T \frac{h}{H}](T_s - T_H), \quad (4)$$

式中, $T_A = \frac{1}{H} \int_0^H T dz$ 为平均水温。式(4)稍加整理并考虑到上均匀层的温度 T_s 与其厚度 h 成反比,随得:

$$T_H = \left(\frac{c}{h} - \frac{c}{hK_T(1 - \frac{h}{H})} \right) + \frac{1}{K_T(1 - \frac{h}{H})} T_A, \quad (5)$$

式中, c 为常数。由式(5)可以看出,对于同一地点、不同年份的同一月份而言, h 的变化是不大的,故 T_H 与 T_A 存在线性关系。

3) 王宗山、孙卫阳、徐伯昌、邹娥梅、李繁华,黄渤海底层温盐数值预报方法的研究——底层盐度二维数值预报模式,《JECSS》M论文集。

4) 王宗山、龚滨、徐伯昌、邹娥梅、李繁华,黄渤海底层温盐数值预报方法的研究——底层温度二维数值预报模式,《海洋学报》。

根据上述,我们将 1959~1982 年的水温剖面资料逐月按不同水深范围寻求 T_H 与 T_A 的关系:

$$T_H = a + bT_A \quad (6)$$

式中, a 为截距; b 为斜率。结果引列于表 1。

表 1 T_H 与 T_A 线性关系系数

月份	水深 (m)	$T_H = a_1 + b_1 T_A$				N	月份	水深 (m)	$T_H = a_1 + b_1 T_A$				N
		a_1	b_1	R	σ				a_1	b_1	R	σ	
1	<30	0.1424	0.9866	0.995	0.257	276	7	<30	-5.8362	1.2189	0.962	1.090	409
	30~50	0.2114	0.9775	0.994	0.247	198		30~50	-6.1623	1.1703	0.859	1.690	272
	>50	0.0199	1.0063	0.989	0.342	261		>50	-2.8572	0.9255	0.850	1.027	326
2	<30	0.0158	0.9974	0.998	0.135	399	8	<30	-8.8706	1.3239	0.956	0.987	569
	30~50	0.1040	0.9908	0.994	0.216	285		30~50	-11.4705	1.3769	0.868	2.185	362
	>50	0.0050	1.0104	0.985	0.430	356		>50	-3.6677	0.8950	0.832	1.361	470
3	<30	-0.0839	1.0038	0.998	0.118	354	9	<30	2.0910	0.9037	0.874	0.738	451
	30~50	-0.0092	1.0043	0.954	0.201	213		30~50	-23.8537	2.0040	0.889	2.315	332
	>50	-0.1380	1.0370	0.993	0.281	272		>50	-4.3522	0.9306	0.745	1.834	376
4	<30	-0.1976	1.0036	0.992	0.284	516	10	<30	-0.0652	1.0039	0.992	0.305	402
	30~50	-0.2382	0.9875	0.973	0.426	306		30~50	-9.6042	1.4434	0.887	1.972	276
	>50	-0.5375	1.0448	0.982	0.397	417		>50	-1.7629	0.8084	0.651	1.807	339
5	<30	-1.2608	1.0591	0.967	0.651	489	11	<30	0.1043	0.9941	0.999	0.110	405
	30~50	-1.1842	0.9892	0.913	0.811	338		30~50	-0.7368	1.0289	0.951	0.792	286
	>50	-1.7148	1.0373	0.936	0.653	463		>50	1.8010	0.6525	0.542	1.769	362
6	<30	-3.9234	1.1715	0.963	0.931	552	12	<30	0.1940	0.9849	0.997	0.198	340
	30~50	-3.3559	1.0658	0.866	1.272	371		30~50	0.2281	0.9618	0.996	0.195	215
	>50	-1.8657	0.9920	0.875	0.841	471		>50	1.7300	0.7786	0.853	0.886	290

由表 1 可看出,相关系数 (R) 除了 9~11 月份水深大于 50m 海区小于 0.8 以外,其余均大于 0.83,其中在 12~5 月份几乎 R 均大于 0.91。此外,在水深小于 30m 的区域,除 9 月外 R 均大于 0.96;从均方差 σ 来看,在 1~6 月份除个别外均小于 1°C ,其中 1~4 月均小于 0.43°C ,此外,在水深小于 30m 的区域,除个别月份外, σ 均小于 1°C 。这表明,除少数月份的个别区域外,上述的线性关系是客观存在的,而且可以在实际中应用(尤其是冬、春季及水深小于 30m 的区域)。

但是,由表 1 可见, a_1 和 b_1 均为水深 H 的函数:

$$a_1 = c_1 + d_1 H + e_1 H^2, \quad (7)$$

$$b_1 = c_2 + d_2 H + e_2 H^2, \quad (8)$$

式中, c_i, d_i, e_i 为经验系数, $i = 1, 2$, a, b 与 H 的回归系数引列于表 2。

由表 2 不难看出,系数 c, d, e 在一年中是有变化的。为了描述它,我们取下式来逼近:

$$c(d, e) = a_{r0} + \sum_{i=1}^r a_{ri} \cos it + \sum_{i=1}^r b_{ri} \sin it, \quad (9)$$

式中, $a_{r0} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} c_i(d, e)$, $a_{ri} = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} c_i(d, e) \cos \frac{2kr\pi}{n}$, $b_{ri} = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} c_i(d, e) \sin \frac{2kr\pi}{n}$; $n = 12$, $r = 1, \dots, 6$ 为项数。按式 (9) 算得的 a_{r0}, a_{ri}, b_{ri} 列于表 3。拟合的标准偏差为 $1.3 \times$

10^{-6} , 相关系数为 1.0。

表 2 a_1 和 b_1 与 H 非线性关系的系数

月份	$a_1 = c_1 + d_1H + e_1H^2$			$b_1 = c_2 + d_2H + e_2H^2$		
	c_1	d_1	e_1	c_2	d_2	e_2
1	-0.107720	0.018304	-0.000255	1.018534	-0.002445	0.000035
2	-0.247265	0.016539	-0.000195	1.015756	-0.001322	0.000019
3	-0.287453	0.013474	-0.000174	1.020236	-0.001294	0.000024
4	-0.296742	0.008675	-0.000193	1.064467	-0.004305	0.000062
5	-1.830094	0.038960	-0.000575	1.239209	-0.011374	0.000128
6	-4.105098	-0.003092	0.000581	1.159406	0.002466	-0.000093
7	-2.631598	-0.223518	0.003403	1.120430	0.008114	-0.000172
8	1.755329	-0.729257	0.010018	0.871974	0.032008	-0.000490
9	61.896626	-3.961215	0.045833	-2.084611	0.196066	-0.002321
10	27.501497	-1.826505	0.022190	-0.360473	0.089121	-0.001101
11	3.862869	-0.250698	0.003384	0.621459	0.025775	-0.000391
12	1.279475	-0.077546	0.001305	0.861000	0.009390	-0.000165

表 3 c_1, d_1 和 $e_1 (i=1, 2)$ 富氏展开系数

	a_{T0}	a_{T1}, b_{T1}	a_{T2}, b_{T2}	a_{T3}, b_{T3}	a_{T4}, b_{T4}	a_{T5}, b_{T5}	a_{T6}, b_{T6}
c_1	7.232385	-3.798800	-10.403971	9.835833	-1.116126	-4.775093	2.917953
		-15.045844	9.224627	3.401845	-7.973598	4.548570	0.000000
d_1	-0.581323	0.444299	0.549280	-0.573868	0.075562	0.250490	-0.146126
		0.989723	-0.630479	-0.169155	0.448013	-0.241288	0.000000
e_1	0.007110	-0.005483	-3.006205	0.006398	-0.000824	-0.002744	0.001492
		-0.011854	0.007330	0.001908	-0.005039	0.002570	0.000000
c_2	0.628874	0.168067	0.498407	-0.431499	0.081866	0.212464	-0.139664
		0.811725	-0.441474	-0.163642	0.402914	-0.262897	0.000000
d_2	0.028517	-0.018922	-0.027077	0.024942	-0.005895	-0.011299	0.007290
		-0.052774	0.028752	0.008862	-0.023316	0.014923	0.000000
e_2	-0.000372	0.000250	0.000303	-0.000270	0.000078	0.000124	-0.000077
		0.000656	-0.000324	-0.000097	0.000263	-0.000171	0.000000

这样,式(6)~(9)即构成给出底层水温 T_H 与水深 H 、时间 t 和垂向平均温 T_A 的关系式。当预报出 T_A 时,通过上述关系式便可得到底层温度 T_H 的分布^①。

三、底层盐度的经验关系

对于底层盐度 S_H 与水深 H 、时间(月份) t 和垂向平均盐度 S_A 的经验关系,遵照第二

节中的推导同样可以建立。表 4~6 所示为根据黄渤海区历史盐度剖面资料确定的 S_B 与 S_A 的线性关系系数 a_2 和 b_2 及 a_2 和 b_2 与水深 H 的非线性关系系数 c_i, d_i 和 $e_i (i = 3, 4)$ 以及它们随时间变化福氏展开的系数。

表 4 S_B 与 S_A 线性关系系数

月份	水深 (m)	$S_B = a_2 + b_2 S_A$				N	月份	水深 (m)	$S_B = a_2 + b_2 S_A$				N
		a_2	b_2	R	σ				a_2	b_2	R	σ	
1	<30	2.8874	0.9083	0.969	0.297	276	7	<30	5.1311	0.8369	0.920	0.396	409
	30~50	2.6868	0.9161	0.951	0.165	198		30~50	-0.6670	1.0302	0.895	0.224	272
	>50	-0.4764	1.0178	0.905	0.218	261		>50	-5.1869	1.1731	0.940	0.211	326
2	<30	1.3795	0.9572	0.988	0.173	399	8	<30	4.6671	0.8531	0.960	0.384	569
	30~50	0.9790	0.9703	0.981	0.107	285		30~50	1.2309	0.9716	0.898	0.273	362
	>50	-0.7577	1.0244	0.988	0.088	356		>50	0.8336	0.9884	0.876	0.287	470
3	<30	0.8989	0.9720	0.995	0.110	354	9	<30	2.3900	0.9245	0.987	0.256	451
	30~50	1.3356	0.9597	0.972	0.123	213		30~50	1.5375	0.9602	0.874	0.289	332
	>50	-0.6375	1.0218	0.986	0.127	272		>50	-1.2786	1.0544	0.867	0.282	376
4	<30	0.9018	0.9720	0.994	0.137	516	10	<30	1.5764	0.9496	0.992	0.249	402
	30~50	1.6585	0.9498	0.954	0.163	306		30~50	0.8815	0.9770	0.847	0.282	276
	>50	-1.5052	1.0508	0.961	0.196	417		>50	-0.9997	1.0465	0.830	0.313	339
5	<30	2.3604	0.9265	0.980	0.209	489	11	<30	0.6364	0.9802	0.997	0.127	405
	30~50	0.6162	0.9848	0.938	0.194	338		30~50	0.9565	0.9715	0.950	0.147	286
	>50	-2.7141	1.0897	0.950	0.195	463		>50	-7.1111	1.2335	0.858	0.295	362
6	<30	2.1627	0.9335	0.972	0.240	552	12	<30	1.5156	0.9522	0.994	0.177	340
	30~50	-0.6162	1.0234	0.939	0.185	371		30~50	1.8266	0.9431	0.968	0.123	215
	>50	-3.7504	1.1247	0.943	0.208	471		>50	-7.7124	1.2486	0.841	0.312	290

表 5 a_2 和 b_2 与 H 非线性关系系数

月份	$a_2 = c_3 + d_3 H + e_3 H^2$			$b_2 = c_4 + d_4 H + e_4 H^2$		
	c_3	d_3	e_3	c_4	d_4	e_4
1	1.068016	0.138151	-0.002508	0.973401	-0.004794	0.000085
2	1.004373	0.038373	-0.001017	0.964539	-0.000952	0.000029
3	-1.636800	0.170456	-0.002394	1.033907	-0.004274	0.000063
4	-3.066397	0.269716	-0.003800	1.096759	-0.008428	0.000119
5	4.034842	-0.068588	-0.000566	0.873069	0.002242	0.000017
6	5.812451	-0.191015	0.000661	0.817433	0.006082	-0.000020
7	13.969062	-0.500866	0.003176	0.515694	0.018360	-0.000127
8	11.305511	-0.409387	0.003849	0.628111	0.013616	-0.000125
9	2.024013	0.048544	-0.001541	0.926222	-0.000870	0.000044
10	1.726897	0.007047	-0.000762	0.952087	-0.000727	0.000034
11	-6.792142	0.517380	-0.008059	1.174602	-0.014191	0.000234
12	-6.240444	0.554263	-0.008925	1.208136	-0.018252	0.000292

表 6 c_i, d_i 和 $e_i (i = 3, 4)$ 富氏展开系数

	a_{00}	a_{21}, b_{21}	a_{22}, b_{22}	a_{23}, b_{23}	a_{24}, b_{24}	a_{25}, b_{25}	a_{26}, b_{26}
c_1	1.934115	-6.584018 0.381445	3.917094 2.292426	0.264459 1.090842	1.490279 1.384683	-0.130964 -1.687250	0.177050 0.000000
d_2	0.047839	0.337693 -0.047996	-0.162876 -0.139149	-0.011477 -0.093364	-0.069327 -0.072814	-0.006707 0.085966	0.003007 0.000000
e_3	-0.001824	-0.003729 0.000645	0.001466 0.002279	0.000444 0.001293	0.000850 0.000925	0.000443 -0.001071	-0.000158 0.000000
c_4	0.930330	0.215338 -0.008390	-0.125757 -0.075122	0.008081 -0.033158	-0.045845 -0.049851	0.005434 0.047569	-0.014181 0.000000
d_4	-0.001016	-0.011127 0.001411	0.005252 0.004567	-0.000553 0.002911	0.002118 0.002602	0.000103 -0.002350	0.000428 0.000000
e_4	0.00054	0.000122 -0.000028	-0.000048 -0.000074	-0.000004 -0.000040	-0.000026 -0.000034	-0.000012 0.000030	-0.000001 0.000000

由表 4~6 可以看出,在全年 12 个月中整个黄渤海区底层盐度 S_H 与垂直水柱中平均盐度 S_A 均具有良好的线性关系,相关系数大于 0.83,均方差(除少数 >0.3 以外)一般均为 0.2 左右。尽管表 6 的拟合均方差为 1.1×10^{-6} 和相关系数也为 1.0,但就总体来看,上述的底层盐度经验关系比底层温度的更好些。

四、结束语

通过上述分析可以清楚地看出,底层温度和盐度与其对应的垂向平均值存在明显的相关性,其中黄渤海区冬、春季和水深小于 30m 水域的全年水温以及研究海区全年的盐度,相关性尤为显著(分别为 0.97 和 0.94),均方差分别平均为 0.46℃ 和 0.21,完全可以满足预报精度的要求。同时,文中还给出了线性回归系数与水深 H 和时间(月份) t 的关系,从而为底层温、盐连续预报提供了方便。此外,由于底层温、盐与水深、时间和垂向平均温、盐间经验关系的确立,便为避开来自海面的热量、质量和动量沿垂向分配的复杂物理过程而发展简便易行的底层温、盐数值预报方法打下了良好基础,并使所建立的预报方法具有很好实用性。

参 考 文 献

- [1] 王宗山、李繁华、龚滨、徐伯昌、邹娥梅:黄渤海水温垂直结构数值预报方法的研究(Ⅱ)——二维数值预报模式,海洋学报,13(4)1991,158~174。
- [2] 王宗山、徐伯昌、邹娥梅、杨可奇、李繁华:黄渤海水温垂直结构数值预报方法的研究(Ⅰ)——一维数值预报模式,海洋学报,13(3)1991,315~324。
- [3] 王宗山、邹娥梅:海洋上层温度结构的参数模式,海洋学报,8(1)1986,8~13。
- [4] 万邦君、郭炳火、陈则实:黄海热结构的三层模式,海洋学报,12(2)1990,137~148。
- [5] 郑东、张瑞安:烟威渔场盐度预报及分析,海洋潮汛通报,4,1981,13~20。

- [6]邱道立、周诗贵、李昌明:黄海南部盐度预报及分析,海洋学报,6(1)1984:10~17.
- [7]王幼琴、刘树勋、韩士鑫:东海近海盐度预报结果分析,海洋通报,8(4)1987:18~24.
- [8]Murakami,M.,Oonishi,Y.,Kunishi,H.:A numerical simulation of the distribution of water temperature and salinity in the Seto Inland sea, *J. of the Oceanogr. Soc. Japan*, 41, 1985, 213~224.
- [9]Omstedt,A., et al., Measured and numerically-simulated autumn cooling in the Bay of Bothnia, *Tellus*, 35a, 1983, 231~240.
- [10]Malkki,P. & Tamsalu,R., Physical features of the Baltic sea, *Finnish Mar. Res.*, 8(252)1985:50~67.
- [11]Stigebrandt, A.: Cross thermocline flow on continental shelves and the location of shelf fronts, *Elsevier Oceanogr. Series*, 32, 1981a:54~64.

The Statistical Relation between the Bottom Temperature-Salinity and Their Vertical Average Values in the Huanghai and Bohai Seas

Wang Zongshan Xu Bochang Zou Emei Gong Bin Li Fanhua
Sun Weiyang

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao)

Abstract

In this paper, based on the historical hydrographic data of the temperature and salinity from 1959 to 1982 in the Huanghai and Bohai Seas, the linear correlation between the bottom temperature and salinity and their corresponding vertical average values in a given depth are constructed. Furthermore, the non-linear correlation between the obtained coefficient and water depth and time (month) are then established. Finally, the empirical relation among bottom temperature and salinity, their average values and water depth and time, is developed, respectively.

This method lays a basis of a simple two dimensional numerical prediction model for the bottom temperature and salinity regardless of the transmission of heat, mass and momentum coming from sea surface in the vertical direction.

Key words: Statistical relation Transmission of heat Momentum