

湖泊中溶解氧极大值之成因

陈镇东 万政康 王冰洁

(国立中山大学海洋地质研究所,台湾高雄市)

提要 本文对位于台湾南部两个次高海拔湖泊——大鬼湖及万山神池进行研究。并试图探讨此二无明显进、出水口之封闭型湖泊中,水体溶解氧垂直分布出现极大值之成因。此二次高海拔湖泊地处偏远,人烟罕至,因此较不受人干扰,为研究湖泊水体中种种自然作用的良好对象。

大鬼湖平均水深约14.8m,最深处约40m,除冬季外,水体均有分层现象。1988年夏季资料显示,水深16m以下水体趋于无氧状态,且于水深8~10m处有溶氧极大值(约7mg/L)出现。但于相同深度,pH或溶氧饱和值却无极大值出现,且于此深度以上的溶氧饱和值,均接近当地的大气饱和值(约78%)。经各种资料推断,此极大值的成因,除水团乃于春季时留下高溶氧值之外,应综合了季节增温效应下使表水向下混合的物理作用(尤其是山区明显的日、夜温差所引起的表水冷却向下混合作用,且其混合深度随著季节增温而逐渐变浅)、消耗溶解氧的生物作用及温跃层存在等影响因素,而非单纯的物理或生物作用所造成。1991年4月万山神池观测资料显示,湖水平均深度约8m,最深可达14m。其溶解氧饱和程度分布在80%~104%之间,表水接近当地饱和值(78%),而于1.5m处往下增加,于2m处有溶解氧及饱和程度极大值,比当时大气饱和值高约20%,此极大值深度与叶绿素a极大值深度相吻合,主要由生物之光合作用造成。此外,于此深度pH值亦有明显增加现象,更证实了生物作用的存在。此二湖泊环境背景相似,且水层中均出现溶氧极大值,但二者间极大值却有不同的成因,经由两不同成因的比较,将可提供许多相关研究资料。

关键词 大鬼湖 万山神池 溶解氧 溶解氧极大值 pH值

1 前 言

影响湖泊溶解氧垂直分布的自然因素很多,例如,湖泊深度、湖面上大气之温度、压力状况(受控于纬度、气候变化及季节变化、海拔高度等)、湖盆形状、水温之垂直分布以及生物作用等^[1,2]。然而在此种种溶解氧垂直分布中,往往会有极大值出现,而造成此溶解氧极大值的因素,并不单纯。此一问题的探讨,亦为湖泊研究之重要课题。

造成湖泊溶解氧极大值的因素很复杂,但大致可分为物理因素、生物因素及此两种作用之综合因素。其中单纯因物理作用造成之溶解氧极大值,较易于发生的为有较高溶解氧,且具有适当密度之侧向水体进入水层中。例如,湖盆周围因降雨冲刷,含较高溶氧的混浊径流水,或有河流带入较低温、并含高溶氧水体等。此现象于分层的水体中,往往因温跃层的存在,使得溶氧极大值稳定存在于温跃层上部。此外,同样于温跃层存在的情况下,若上层水的

收稿日期:1993年10月14日;接受日期:1993年12月22日。

作者简介:陈镇东,男,1949年生,教授。1977年美国迈阿密大学海洋化学系博士毕业。著有《海洋化学》专著,并发表论文200余篇。

混合作用不明显,加上温跃层之下的水体由于长期滞留,无法获得上层水体溶氧的补充,再加上有机质分解,及沉积物中还原物种之释放并氧化,均会消耗溶氧,而使水体呈缺氧状态。此时若气温持续升高,将造成表水增温现象,此亦可造成溶解氧极大值。原因在于表水增温,使其饱和程度增加。当过饱和时,表水中过饱和的溶氧将释回大气中。而其下之氧气无法释放,因而形成溶解氧极大值,而此溶氧极大值之成因,乃综合了与水、气交换有关之物理作用,及有机质的形成、分解相关之生物作用所造成。

生物作用中浮游植物成层分布,并行光合作用放出溶解氧,为许多水体中溶解氧极大值的主要成因。湖泊中光合作用主要由浮游植物进行,此外某些细菌亦可行光合作用放出氧气。因此,浮游植物的垂直分布,直接影响溶解氧极大值的所在深度。湖水中浮游植物的生长,主要受到光照、温度、溶氧及营养盐等因子控制,且其分布常因湖水分层,而成层分布。因此,在浮游植物富集的水层中,往往为溶解氧极大值所在。然而,生物作用除光合作用外尚有呼吸作用及生物死亡后之分解作用,而这些作用均会消耗水体中的溶氧。所以,由生物作用所造成的溶解氧极大值,大都为暂时性现象,常随浮游植物之消长,而有季节性甚至于日夜的变化。

台湾地区由于山多平地少的地理环境限制,境内缺乏大型的天然湖泊,且由于人口稠密,湖泊大都受到人为干扰。因此,能够提供作为湖泊各种自然现象研究的对象并不多。台湾地区较大范围且较有系统的湖泊相关研究,仅始于近年^[3]。在后续研究中发现,台湾地区次高海拔湖泊,由于地处偏远,人烟罕至,因此较不受人为干扰影响。目前所知最深的二个次高海拔湖泊,为大鬼湖及万山神池,本文即藉此两湖泊所得之溶解氧垂直分布资料,来探讨湖泊中溶解氧极大值的不同成因。

2 大鬼湖及万山神池之地理背景

大鬼湖位于 22°52'N、120°51'E,即高雄县茂林乡境内,海拔 2150m,湖面长约 650m,宽约 300m,面积 11.25hm²(由航照图估算出)。大鬼湖最深达 40m,平均深度 14.8m,总蓄水量 1.673×10⁶m³,而湖盆相当陡峭,一年中除冬季外,水体均有分层现象;且其温跃层下多呈缺氧状态(图 1),为目前所知台湾地区最大且最深之次高海拔天然缺氧湖泊,亦为一贫营养湖泊^[4~6]。此湖无明显的水流流入,但在其西北角有流水出口,为山花奴奴溪的源头。

万山神池为当前台湾地区第二深之次高海拔湖泊,位于 22°54'57"N、120°49'10"E。湖形狭长,呈西北-东南走向,湖长约 200m,宽约 60m。海拔高度约 2150m,平均深度约 8m,最深约可达 14m。观测期间(1991 年 4 月)表水温度 14.6℃,并往下递减,于 4.6m 处约为 12.2℃,上层厚度约 1.3m,温跃层相当明显,斜率约 1℃/m,较其它台湾地区湖泊温跃层来得高,而与目前唯一天然缺氧湖泊大鬼湖之温跃层斜率 1.2℃/m 相当。如此大的斜率,显示万山神池在下水层(hypolimnetic)很可能也缺氧,但因只取 4.6m 的数据(当时水深约 10m),而无法判断。两湖之地理特色综合简述如下:

- (1) 位置偏远、人烟罕至,为少人为干扰之天然次高海拔湖泊;
- (2) 遮蔽良好、湖盆陡峭、湖水较深且有分层现象;

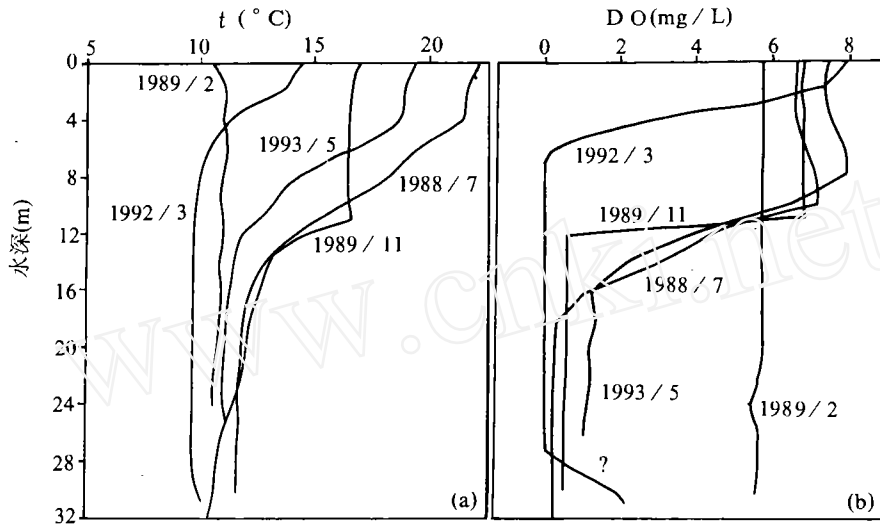


图 1 历年不同季节大鬼湖之温度(a)和溶解氧(b)垂直分布

Fig. 1 Seasonal profile of temperature and DO in the Great Ghost Lake

(3) 湖沼四周植生茂密,地质背景均呈第三纪之轻度变质板岩。

3 大鬼湖与万山神池溶解氧极大值之成因

1988年夏季大鬼湖湖水温度随深度之变化如图2所示。上层水厚约4m,水温约22℃,于4~12m处有一明显温跃层存在,斜率为1.17℃/m,下层水由12m以下至底层30m处,水温约由13℃降至10.5℃。

湖水含氧量随着深度之变化如图2所示。表层含氧量约6mg/L,8~10m处有溶氧极大值出现(约7mg/L),而于10~16m间明显地往下锐减,16m以下至底部则趋于无气状态。由图1之大鬼湖四季水温及溶氧变化显示除冬季溶氧因湖水翻滚而上、下一致外,其他季节湖水溶氧之垂直分布,均受到温跃层存在的影响。当湖水温跃层形成后,下水层既因温跃层的屏障作用而阻碍了溶解氧由上覆水层进入,加上湖盆内大量有机质分解(表层沉积物有机质含量高达20%),及还原性物质(二价铁、二价锰、甲烷等)由沉积物中释放并氧化^[4,6],使得下水层溶解氧迅速消耗而呈缺氧状态。温跃层中溶解氧与温度相似,均由上向下明显减少。温跃层上之风混层由于有溶解氧持续补充,及由温跃层阻挡缺氧之下水层上下混合,因此即使随着水温增高、水层增厚,风混层之溶氧不致于减少。至于上水层溶解氧如何于持续增温的季节中补充,除植物的光合作用外、大气中氧气的扩散与溶解、降雨或湖盆周围的径流水带入,及造成饱和和表水向下混合的作用,如风吹引起之混合作用,及日、夜温差变化(平均日、夜气温差约可达10℃)^[4]造成之表水沉降混合作用,亦为主要供氧机制。但除植物之光合作用外,其它作用均必需在上水层未达溶氧饱和时方成立。若上水层呈溶氧过饱和状态,则反而将使溶氧减少。总之,除植物之光合作用外,其它作用可促使上水层趋于饱和状态。

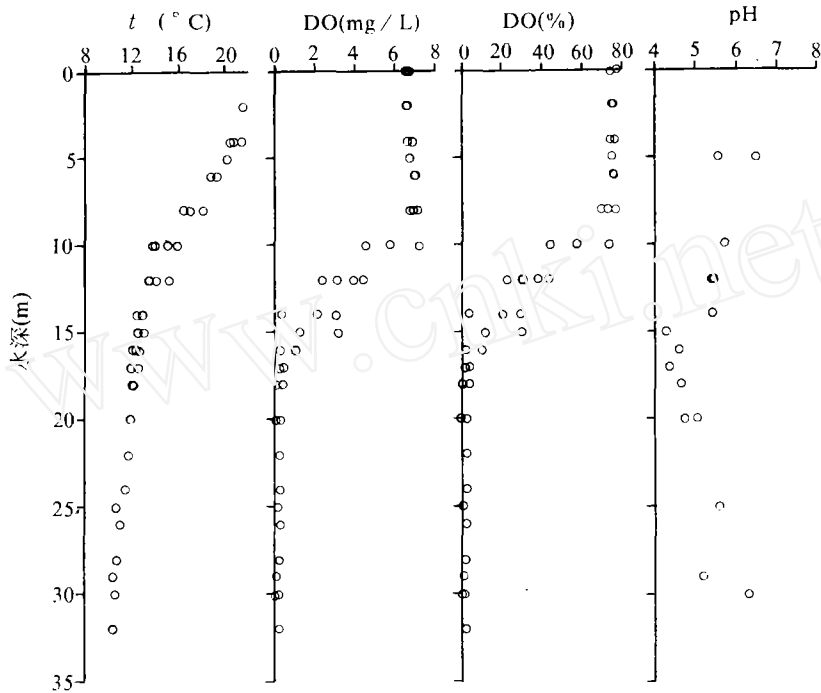


图2 1988年7月大鬼湖之温度、溶解氧饱和度及pH值垂直分布

Fig. 2 Profile of temperature, DO(mg/L), DO(%) and pH in the Great Ghost Lake in July, 1988

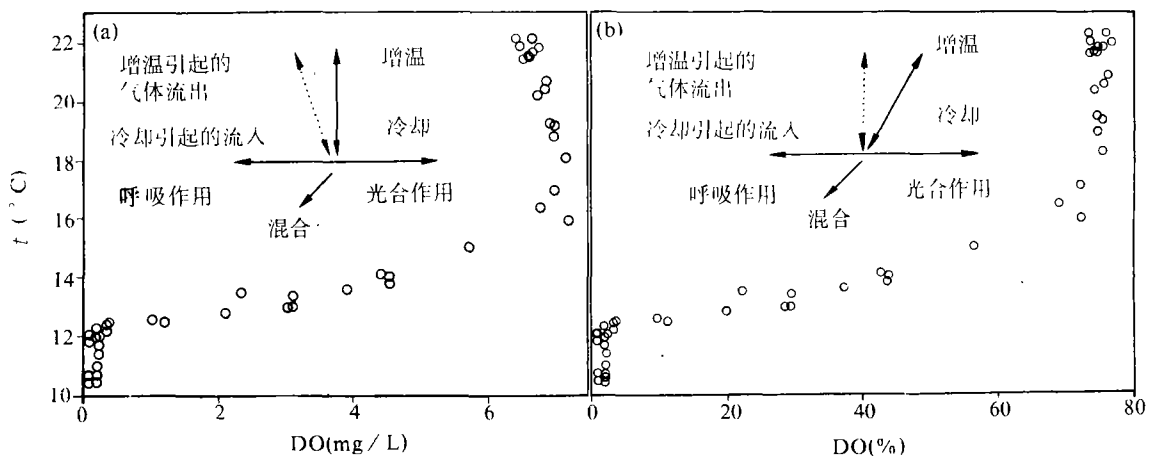


图3 1988年7月大鬼湖温度与溶解氧(a)及溶解氧饱和度(b)的关系及影响因子

Fig. 3 Relation of temperature with DO(mg/L) and DO(%) in July, 1988 and affecting factors

夏季大鬼湖湖水溶氧量在8~10m处有极大值出现,而此极大值可能单纯由生物作用或物理作用造成,亦可能由两者之综合作用造成。若为生物作用,主要乃因浮游植物成层聚集,并且行光合作用放出氧气所造成。若为物理作用引起,则主要与水体之温度变化,及水气界面之氧气交换有关,或由于有较高密度及溶解氧之水体进入水层中而造成。为确定此极大

值是否为浮游生物光合作用所引起,我们可利用温度对溶氧量,以及温度对溶氧饱和度作图^[5,7~9],并配合可能的物理作用来判断。

图 3a 显示,在整个系统封闭的状况下,若温度不变,生物之光合作用会使得溶氧量增加,因此图中的点水平往右移。而生物的呼吸作用会使得溶氧量降低,图上的点会水平往左移,若在封闭系统(没有气体交换)情况下,单纯的增温或冷却作用,对溶氧含量不产生影响,图上的点只会上下移动。增温若造成上层水体更进一步分层,对溶氧含量亦无影响,但若冷却作用,引起水体向下与较下层之较低溶氧水体混合,会使温度及溶氧均降低,图上之点往左下移动。

若为水气交换的开放系统下,且有适当的水体垂直混合机制(如表水的风力混合作用、及日夜温差造成表水沉降的垂直混合作用)存在,则增温作用形成的过饱和,会使原本接近饱和溶氧水体的表水释放氧气,使图上之点往左上移动。而开放系统下的冷却作用,可使饱和度增加,因此增加溶氧含量,图上之点往右下移动。

以溶氧饱和度来看(图 3b),生物的呼吸、光合作用,同样的会使得图上的点水平左右移动。但是在封闭系统下,冷却作用造成水温降低,气体溶解度增加,在溶氧未得补充的情况下,使得原本水体的饱和程度降低,图上之点往左下移动。若由于冷却作用,同时引起垂直混合作用,会使水体溶氧饱和度进一步降低,图上之点继续往左下移动。而封闭状况下的增温作用,则会使水体溶解氧饱和度增加,图上之点往右上移动。

若为水气交换的开放系统下,冷却作用增加水体吸收溶氧的能力,但溶氧饱和度不变,图上之点往下移。冷却引起之垂直混合作用,使水体溶氧饱和度降低,图上之点往左下移。而增温作用在开放系统下,降低水体吸收溶氧之能力,但因而过饱和之溶氧会释出,使溶氧饱和度不变,图上之点垂直往上。

比较图 3a、b 可以看到溶氧量极大值的出现,在温度对饱和度作图时消失,可见此信号应非生物之光合作用所造成。如果此信号为产生氧,并消耗二氧化碳之光合作用所致,则 pH 值于此深度应有极大值出现。然而资料显示,pH 随深度之变化并没有极大值出现(图 2)。可见溶氧量之极大值,非单纯由生物之光合作用引起。排除生物作用之后,大鬼湖溶解氧极大值,应与前述的冷却及增温物理作用有关。然而温跃层之存在与否,亦为关键因素。温跃层之存在,使得高溶解氧水层得以稳定于温跃层上部,并阻挡了其下缺氧水体向上混合。。此外,若无温跃层之屏障,下水层将不致使含氧量减少,如此溶解氧极大值亦将不存在。因此,除物理作用外,有机质分解及生物呼吸等生物作用,亦为造成大鬼湖溶解氧极大值成因。极大值以上之水层(厚约 10m)饱和度相近,并接近当时大气饱和值(海拔 2150m,约 78%),显示前述开放系统下的增温作用,已藉由逐渐变浅,且由风及日、夜温差引起之垂直混合作用,使上水层溶氧饱和度和值趋于一致。

万山神池之溶解氧及其饱和度、温度及 pH 值垂直分布如图 4 所示。观测日期 1991 年 4 月 22 日。结果显示,溶氧饱和度介于 80%~104%之间,水表值(80%)与理论饱和值相近(78%,2150m)^[7,10],而在 1.5m 处往下递增,于 2m 处有极大值出现,比大气饱和值高约 20%。此极大值可能是浮游植物在此聚集,亦可能是物理作用所造成;为确定此信号是生物作用引起,亦或是与前述供氧机制有关的物理作用造成,我们同样以温度对溶氧量、溶氧饱和度和 pH 值作图(图 5a、b、c)来判断。利用前段所述之理论及图 3 所示之作用,温度对溶解

氧极大值的信号,在温度对溶解氧饱和度之图上还是存在,且较当时大气饱和度高出约20%,此非一般物理作用所能造成,可见此信号应为浮游植物之光合作用引起。另外,若此层溶氧量极大值是由生物光合作用引起,则在产生氧的同时,势必耗掉 CO_2 ,因此pH值于此深度应有极大值出现。由图5c看,pH在此深度确实比上层来得高,可见溶氧量之极大值应由生物作用引起。此外,由叶绿素a分析显示,于水深2m处有叶绿素a之极大值存在^[11],此亦可证明万山神池之溶解氧极大值,乃由浮游植物之光合作用所造成。

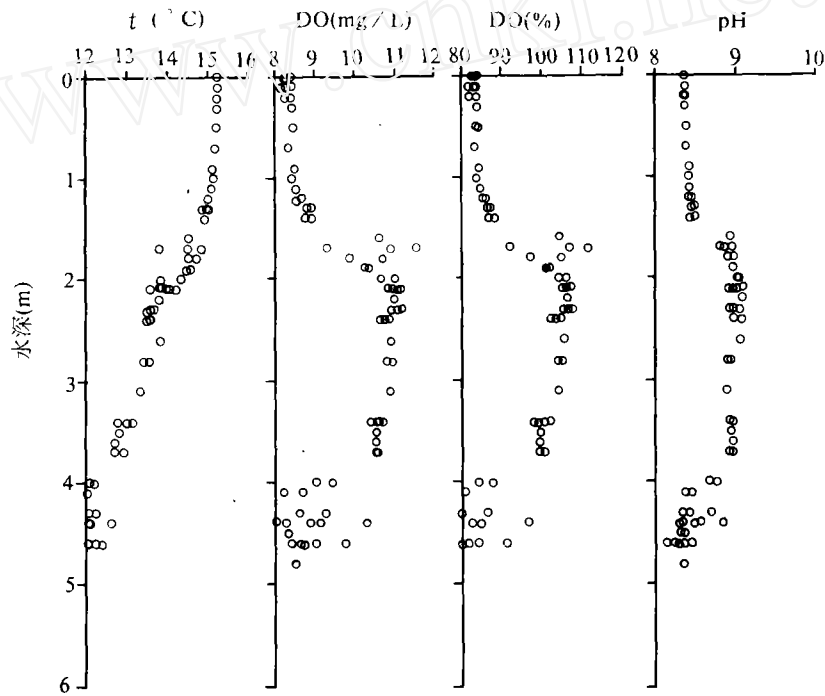


图4 1993年4月万山神池之温度、溶解氧、溶氧饱和度及pH值垂直分布

Fig. 4 Profile of temperature, DO (mg/L), DO (%) and pH in Wannsan Divine Lake in April, 1991

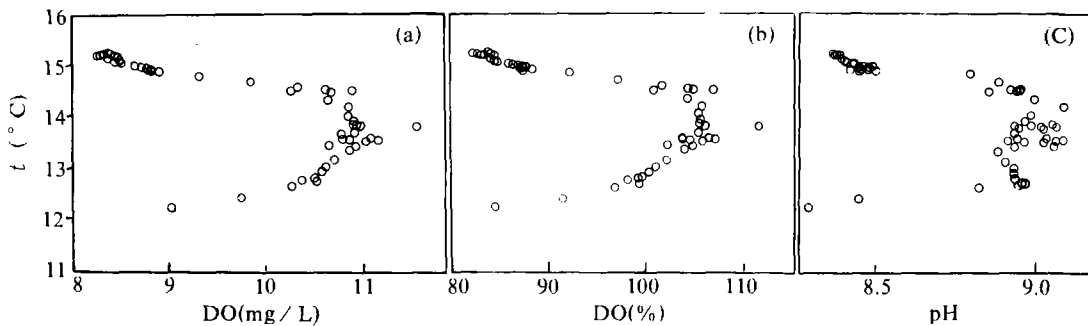


图5 1991年4月万山神温度与溶解氧(a)溶氧饱和度(b)及pH值(c)间的关系

Fig. 5 Relation of temperature with DO (mg/L), DO (%) and pH in Wannsan Divine Lake in April, 1991

4 结 论

大鬼湖及万山神池具相似的地理环境,且水体均出现溶解氧极大值。但由于明显的浮游植物量差异(大鬼湖 1991 年 3 月表水资料,叶绿素 a 极大值约 $3\mu\text{g/L}$;万山神池 1991 年 4 月表水资料,极大值高达 $12\mu\text{g/L}$ ^[10]),使两者间溶解氧极大值成因迥然不同。大鬼湖溶解氧极大值成因,综合了复杂的物理作用、耗氧的生物作用、及温跃层存在等影响因素。而万山神池则似乎由单纯的生物作用所造成。然而,实际上浮游植物的分布,亦会受到温跃层存在的影响^[12,13]。影响水体中浮游植物量的因素很多,而其中营养盐含量为一主要因素,往往成为浮游植物生长的限制因子。因此,生物作用引起的溶解氧极大值,易发生于较营养的湖泊;相反地,物理作用引起之极大值,则常于贫营养湖泊出现。此外,两种作用造成之溶解氧极大值,亦有许多差异存在。一般生物作用引起的溶解氧极大值,其浓度变化较大,且存在时间较短,随光合作用之消长而有所变化。而物理作用造成之溶解氧极大值,通常浓度变化较小,而持续时间较长,随水温垂直分布改变而呈季节性变化。

致谢 本研究先后由环保署及国科会资助,罗建育、黄明祥、徐云龙、刘善良、李悦田、林志明、彭忠仁、林中兴、陈正旺、郭景圣、陈佳奇、张雷风、黄炳达、黄行志、曾美宽、王巧萍及李腾安等人提供协助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 潘红玺. 横断山区湖泊中溶解氧的分布特征. 湖泊科学, 1990;4(2)
- 2 Hutchinson G E. A treatise on limnology, Vol. 1, Part 2: chemistry of lake. New York, Toronto; John Wiley & Sons Co., 1975. 1015
- 3 陈镇东, 洪佳章, 王冰洁. 台湾地区湖沼酸化之过去、当前与未来. 中山大学海洋地质研究所报告第 2 号, 1988. 131
- 4 王冰洁. 大鬼湖无氧层的成因及其生物地球化学作用. 国立中山大学硕士论文. 1989
- 5 Chen C T A and Wang B J. Winter overturning of the anoxic Great Ghost Lake. *Proc Natl Sci Counc, ROC (A)*, 1990, 14;11~15
- 6 Wang B J and Chen C T A. Geochemistry of the anoxic Great Ghost Lake. *Proc Natl Sci Counc, ROC (A)*, 1990, 14; 16~20
- 7 Chen C T. Oxygen solubility in seawater. In: R Battino ed. Solubility data series V. 7; Oxygen and ozone. Pergamon Press, 1981. 41~55
- 8 Chen C T. Preliminary observation of oxygen and carbon dioxide of the wintertime Bering Sea marginal ice zone. *Continental Shelf Research*, 1985, 4; 465~483
- 9 陈镇东. 极区海水含氧量之冬夏对比. 见: 海洋科学学术研讨会论文集. 海洋科技研讨会专刊第 10 集, 1987
- 10 Benson B B and Krause D Jr. The concentration and isotopic fractionation of gases dissolved in freshwater in equilibrium with the atmosphere. 1; Oxygen. *Limnol Oceanogr*, 1980, 25; 662~671
- 11 陈镇东, 洪佳章, 刘文微. 台湾地区酸性沉降调查评估研究计划子题(4): 酸雨对台湾自然水域及土壤酸化影响之研究. 国立中山大学海洋地质研究所报告第 12 号, 1991
- 12 Cole G A. *Limnology*. Louis, Toronto, London; C V Mosby Co, 1979. 426
- 13 Wetzel R G. *Limnology*. Philadelphia, London, Toronto; W B Saunders Co, 1975. 743

FORMATION OF DISSOLVED OXYGEN MAXIMUM IN LAKES

C. T. A. Chen J. K. Wann B. J. Wang

(*Institute of Marine Geology, National Sun Yat-sun Univ., Kaohsiung, Taiwan*)

Abstract

This study elucidates the main cause for the dissolved oxygen maximum of the Great Ghost Lake and Wannsan Divine Lake, both belonging to the best preserved natural lakes in Taiwan, with little pollution because of high elevation and isolation. There are also deep natural lakes, suitable for study of chemical, physical, and biological processes under natural, undisturbed conditions.

The average depth of the Great Ghost Lake is about 14.8m, the max. depth is about 40m and the water body is stratified annually except in winter. Based on the data collected in summer(1988), the oxygen content was about 6 mg/L at surface and was sharply reduced between 10m and 16m, and became anoxic below 16m. There was an oxygen maximum of about 7 mg/L (close to saturation) at 8~10m. The maximum was mainly controlled by physical processes driven by surface cooling accompanied with oxygen influx during the previous seasons. The subsurface remnant cooler water with high oxygen content remained steady while the surface layer warmed. Below the maximum oxygen, the oxygen content was sharply reduced because of mixing with anoxic water below. Photosynthesis did not play a major role and there was not a pH maximum at the oxygen maximum.

The average depth of Wannsan Divine Lake is about 8m and about 14m in maximum depth. The saturation of oxygen ranged between 80%~104%. The surface water, at 80%, was close to the saturation value of 78%, and the oxygen content increased with depth below 1.5m. There was a maximum of oxygen saturation, about 20% higher than the solubility, at 2m. Contrary to the phenomena found in the Great Ghost Lake, the maximum at Wannsan Divine Lake was mainly caused by photosynthesis and was accompanied by a pH maximum.

Key Words Dissolved oxygen, oxygen maximum, pH, the Great Ghost Lake, Wannsan Divine Lake