

中国雲南省湖沼（洱海、杞麓湖、滇池）の水質とその特性
CHARACTERISTICS OF WATER QUALITY OF LAKES IN YUNNAN PROVINCE, CHINA.
(LAKE ERHAI, LAKE QILU AND LAKE DIANCHI)

橋 治国^{*}、相崎守弘^{**}、福島武彦^{**}、村岡浩爾^{***}、金 相灿^{****}
Harukuni TACHIBANA^{*}, Morihiro AIZAKI^{**}, Takehiko FUKUSHIMA^{**}, Kohoji MURAOKA^{***}
and Xiangcan JIN^{****}

ABSTRACT; Water quality of three large lakes (L. Erhai, L. Qilu and L. Dianchi) in Yunnan Province, China was studied to evaluate the eutrophication level and to analyze its process. It was found that three lakes were polluted eutrophically though each lake had its own character. Among three lakes, L. Dianchi near Kunming city was extremely eutrophicated with TN being over 4 mg/l and TP being over 0.4 mg/l. One river flowing into L. Dianchi had more than 20 mg/l of TN and 2-4 mg/l of TP. These show that eutrophication in this province is caused by a great amount of nutrient load originated from city, industrial and agricultural activities. It is necessary to decrease and control the pollution loads to conserve the specific eco-system as soon as possible. In L. Dianchi, the concentration of nutrients was observed to decrease as the sampling points came nearer to the outflowing point. In this lake, self-purification process contribute to recover the deteriorated water quality.

KEYWORDS; Eutrophication, Water Quality, Lakes, Nutrients, China

1. 緒言

湖沼の富栄養化は、そのレベルや発現形態は異なるものの、近年の共通した世界の水環境問題である。従って様々な地域で、湖沼の多様な富栄養化の比較によって、共通した富栄養化の特徴やその制御方法、あるいは湖沼の特異性や個別の管理方法をみつけることができよう。筆者らは、文部省国際学術研究「日中富栄養化湖沼の水質変動特性の湖沼学的比較研究」（1988年～1991年）（注1）の一環として、中国雲南省の代表的な3湖沼（洱海、杞麓湖、滇池）の水質を富栄養化を中心に調査する機会を得た。調査結果の一部は、調査報告書（相崎ら¹⁾）として、またアジアの富栄養化湖沼の比較研究（福島ら²⁾）として、公表されてきた。

本論文では、これら雲南省の3湖沼の富栄養化の実態を、水質分析結果とともに水質学の立場から報告する。また富栄養化がもっとも深刻な滇池については湖内の水質変化と流入河川水質との関係について解析し、富栄養化のメカニズムと制御方法について若干の検討を試みた。

2. 研究方法

2.1 調査対象湖沼

雲南省の代表的な湖沼である、洱海、杞麓湖、滇池を調査対象とした。3湖沼の湖盆形態を図1～3に、

* 北海道大学工学部衛生工学科 Dep. of Sanitary Eng., Hokkaido Univ.

** 国立環境研究所地域環境研究グループ Regional Envi. Div., Nat. Insti. Envi. Stu.

*** 大阪大学土木工学科 Dep. of Civil. Eng., Osaka Univ.

**** 中国環境科学研究院 Chinese Res. Academy Envi. Sci.

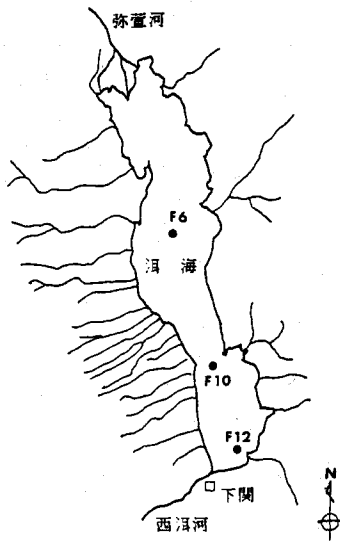


図1 洱海

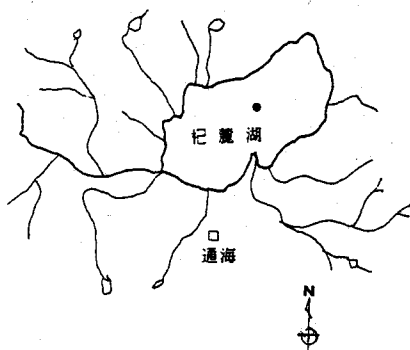


図2 杞麓湖

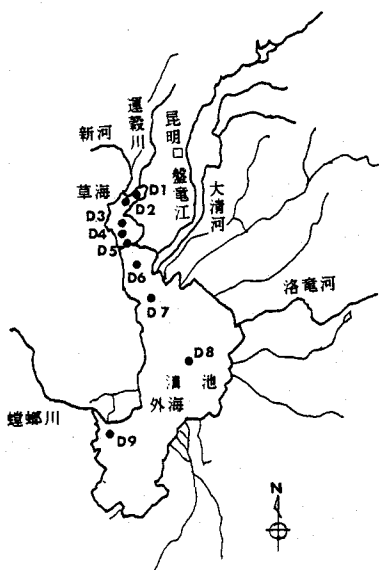


図3 滇池

表1 洱海の概況

(東経100度05分～100度17分、北緯25度35分～25度58分) * <1952-1982>

気候	高原季風
水位	1974m
平均気温*	16.2°C (過去最高34°C<'51.6>、過去最低-3°C<'69.1>)
年降水量*	1000～1100mm (最大1394mm、最小654mm) 雨期 (6-10月) 80%
水系	瀾滄江
集水面積(含湖面)	2565km ² (耕地 14%、山林 約70%)
湖沼面積	平均246km ² (長さ40.5m、平均幅6.3km)
周囲延長	115km
容量	平均 27.7億m ³
平均水深	10.5m (最深部 20.9m)
流入河川	茨碧湖(弥董河)、西湖、蒼山流出 18河川
流量	平均8.12億m ³ /年 (最大18.05億m ³ /年、最小1.84億m ³ /年)
流出河川	西河(→瀾滄江→メコン河) 平均8.16億m ³ /年 (最大19.19億m ³ /年、最小4.14億m ³ /年)
水需要	農業、発電
人口	64.79万人 (253人/km ²)

表2 杞麓湖の概況

(東経102度43分～102度49分、北緯24度08分～24度13分) * <1959-1981>

気候	亜熱帯性、高原地
水位	1796m
平均気温*	15.6°C (最冷月1月 9.0°C、最熱月7月 19.9°C) (最高気温 31.9°C、最低気温 -5.4°C)
年降水量*	平均869.5mm、 最大1160.2mm (1968年)、最小610.6mm (1963年) 雨期 (5月中旬-10月) 76.8%
水系	西江
集水面積 (含湖面)	340.84km ² (耕地 53.8%、森林<1950年代30%、1984年12%>)
湖沼面積	36.86km ²
周囲延長	32km
容量	1.48億m ³ (最大1.66億m ³ (1971年)、最小0.163億m ³)
平均水深	4.0m (最深部 6.8m)
流入河川	流量 0.7358億m ³ /年 (雨、地下水)
流出河川	カルストドリーネ
水需要	農地、水田、山地
人口	20.42万人 (599人/km ²)
その他	年流入泥砂 3万m ³ /年

表3 滇池の概況

(東経102度37分～102度48分、北緯24度40分～25度02分) * <1956-1979>

気候	亜熱帯性、高原地
水位	1886～1888m
平均気温*	14°C (1月7.8°C、最大19.9°C)
年降水量*	977mm (雨期85%、乾期15%) 雨期 (5-10月)、乾期 (11-4月)
水系	金沙江
集水面積(含湖面)	2920km ² (耕地 17.1%、山地 約70%)
湖沼面積	292.5～322.34km ² (草海12km ² 、外海288km ²)
周囲延長	151.5km (南北37km、東西7.7km)
容量	13億m ³
平均水深	3.39～5.12m (草海1m)、最深部 9.3～11.3m
流入河川	20河川以上
流量	6.906億m ³ /年、最大河川 松花堤2.1×10 ⁹ m ³ /年
流出河川	螳螂川=別名 海口川→普渡川→長江 4.515億m ³ /年
水需要	農業用水3.5億m ³ /年、飲料水 1.782億m ³ /年 工業用水 1.527億m ³ /年
人口	180.39万人 (688人/km ²)

表4 水質分析結果 (1988年、*: 計算値)

湖沼 (P mmHg)	地点 (水深 m)	採水 m	月日	時刻	天候	流量 m ³ /S	気温 ℃	水温 ℃	pH	EC μS/cm	DO mg/l	DO %	透明度 m	SS mg/l	COD(T) mg/l	COD(F) mg/l	COD(SS) mg/l	TOC(T) mg/l	TOC(F) mg/l	TOC(SS) mg/l
洱海 L. Erhai (603)	F6 (16.5)	0.5	9.10	12.30	晴		23.5	22.1	8.39	220	6.5	96	6.0	1.3	3.4	3.0	0.4	2.8	2.4	0.4
		6.0	9.10	12.30	晴			21.8	8.36	213	6.3	93								
		15.0	9.10	12.30	晴			21.7	8.40	212	6.2	91		1.5	3.3	3.1	0.2	3.0	2.7	0.3
	F10 (5.0)	0.5	9.10	11.20	晴		21.5	21.1	8.86	189	6.5	95	4.7							
		3.0	9.10	11.20	晴			21.1	8.96	192	6.5	95								
		6.0	9.10	11.20	晴			21.0	8.90	185	6.5	94								
	F12 (2.9)	0.5	9.10	9.50	晴		20.5	21.1	8.70	238	6.4	93	2.9	2.4	3.9	3.0	0.9	3.0	2.8	0.2
		3.0	9.10	9.50	晴			21.1	8.92	182	6.3	92								
杞麓湖 L. Qilu (615)	湖心 (6.0)	0.5	9.13	15.20	晴		28.9	23.1	8.96	390	8.1	120	0.6	39.2	20.8	12.4	8.4	23.3	12.5	10.8
		2.5	9.13	15.20	晴			21.9	8.95	395	7.4	107								
		4.5	9.13	15.20	晴			21.7	8.91	368	6.5	94								
滇池 L. Dianchi (613)	D3 (0.6)	0.5	9.15	9.40	曇		19.3	20.5	7.93	524	2.9	41	0.6	26.8	13.3	7.6	5.7	11.2	5.6	5.6
	D8 (5.0)	0.5	9.15	11.40	曇		20.7	20.6	8.77	376	7.0	99	1.0	10.9	10.9	6.8	4.1	8.2	5.9	2.4
		3.0	9.15	11.40	曇			20.2	8.73	379	6.2	87		12.1	10.7	7.2	3.5	8.7	5.9	2.8
		0.5	9.15	15.30	曇			21.8	8.66	387	7.4	107	1.1	12.0	9.2	6.0	3.3	7.5	5.6	1.9
新河 R. Xinhe 運粮川 R. Yunlianghe	(1.7)		9.15	17.35	晴	2.60	27.7	21.1	8.39	738	1.4	20		33.4	27.8	21.3	6.4	27.1	20.9	6.2
	(1.1)		9.15	18.00	晴	1.50	23.9	24.5	7.36	901	0.2	2		37.2	24.8	16.1	8.7	28.7	19.1	9.5
盤竜江 R. Panlong 大清河 R. Daqinghe 洛竜河 R. Luolonghe	(1.85)		9.16	8.45	晴	37.20	23.5	18.0	8.10	245	5.4	73		68.2	4.4	3.1	1.3	4.0	2.1	1.9
	(0.75)		9.16	10.00	晴	3.30	23.5	17.9	7.31	984	0.3	3		50.5	28.4	20.3	8.1	46.6	25.0	21.6
	(0.35)		9.16	11.00	晴	1.50	25.6	17.3	8.15	261	6.9	92		104.1	3.7	2.4	1.4	2.4	1.3	1.1

湖沼 (P mmHg)	地点 (水深 m)	採水 m	TN* mg/l	DN mg/l	TP mg/l	DP mg/l	POC mg/l	PON mg/l	PP mg/l	Chl-a μg/l	Cl- mg/l	SO42- mg/l	Na+ mg/l	K+ mg/l	Ca2+ mg/l	Mg2+ mg/l	Si mg/l
洱海 L. Erhai (603)	F6 (16.5)	0.5	0.35	0.32	0.010	0.009	0.16	0.030	0.001	2.2	2.8	5.7	7.5	2.35	16.1	11.0	0.34
		6.0								3.2							
		15.0	0.48	0.45	0.012	0.010	0.15	0.028	0.002	3.1	2.5	5.2	7.3	2.56	20.3	11.3	0.12
	F10 (5.0)	0.5								2.7							
		3.0								2.3							
		6.0								2.4							
	F12 (2.9)	0.5	0.48	0.43	0.019	0.010	0.31	0.057	0.009	4.0	2.6	5.6	7.8	2.64	20.2	11.2	0.10
		3.0								3.8							
杞麓湖 L. Qilu (615)	湖心 (6.0)	0.5	2.02	1.07	0.046	0.023	8.78	0.951	0.023	53.5	23.2	39.7	15.6	10.70	16.2	32.1	1.46
		2.5								66.5							
		4.5								66.4							
滇池 L. Dianchi (613)	D3 (0.6)	0.5	4.43	3.69	0.428	0.288	4.05	0.737	0.140	170.5	45.6	41.2	33.5	9.65	56.2	14.2	3.27
	D8 (5.0)	0.50	0.98	0.73	0.043	0.016	1.55	0.246	0.027	30.9	37.5	42.5	27.0	7.22	27.9	17.5	0.18
		3.00	0.95	0.70	0.040	0.017	1.60	0.255	0.023	33.5	38.3	42.7	27.4	7.06	26.0	16.5	0.14
		0.5	0.94	0.70	0.042	0.014	1.47	0.238	0.028	20.1	38.3	43.3	26.7	7.02	28.2	17.4	0.30
新河 R. Xinhe 運粮川 R. Yunlianghe	(1.7)		3.25	2.82	0.728	0.059	3.79	0.439	0.669		91.7	70.2	74.9	9.71	60.3	17.8	3.94
	(1.1)		15.00	14.08	1.223	0.929	5.51	0.920	0.294		69.4	93.9	45.1	18.50	83.1	14.6	5.92
盤竜江 R. Panlong 大清河 R. Daqinghe 洛竜河 R. Luolonghe	(1.85)		1.61	1.29	0.088	0.022	2.80	0.318	0.066		4.4	9.9	3.6	1.91	26.4	6.8	2.28
	(0.75)		23.42	21.49	4.464	0.243	10.14	1.930	4.221		95.4	47.7	51.7	13.40	61.1	15.6	5.06
	(0.35)		0.84	0.64	0.056	0.017	1.85	0.201	0.039		3.5	6.0	3.3	1.70	36.5	8.1	4.61

湖盆形態や気象条件などの概況を表1～3にまとめた。洱海は、農業用水の供給源や漁業の場として古くから利用されている。しかし最近の工業活動の結果、産業排水が流入して汚染が広がりつつある。湖特産の「弓魚」が見られなくなったという報告もある。杞麓湖においては、産業や生活排水による水質汚濁の他、流域内の農地開発による森林被覆率等の減少に伴って多量の懸濁物質が流入して水深が浅くなり、富栄養化が深刻な問題となっている。滇池は、1970年代から昆明市からの生活排水や産業排水の流入によって、その水は有機的にも、また富栄養化レベルとしても、かなり汚染されている。滇池は、草海と外海の2湖盆に分かれており、特に草海の汚染が著しい。また草海では、市内からの高い栄養塩負荷によって、ホテイアオイの繁茂が一面にみられる。昆明市は、本湖の水質汚濁防止対策に精力的に努力している。(本項の内容の一部は、文献^{3),4)}を参考とした。)

2. 2 調査方法

雲南省の湖沼調査は、1988年9月5日から21日（1988年調査と呼ぶ。）まで、雨期の3湖沼と滇池流入河川を対象として、また1989年11月26日から12月6日（1989年調査と呼ぶ。）まで、乾期の滇池とその流入河川を対象として行った。1989年調査では、湖における栄養塩を中心とした水質成分の動態を明らかにするため、湖内では合計11地点で、流入河川では合計6地点で採水した。調査は、中国環境科学院水環境科学研究所をはじめ地域の環境研究部門の協力を得て実施された。（注2）水質は、一部を現地で分析したが、多くは試料を前処理後、日本に試料を持ち帰ってから分析した。試料は、中国の国内法規にしたがって、出国前に高圧滅菌処理を施したため、分析項目が制限された。

2. 3 分析項目

調査現場では、気圧、気温、水温、透明度を、河川ではさらに流量を観測した。水質分析項目は富栄養化に関連した水質成分と一般無機イオン成分を中心に選択した。試料の高圧滅菌処理や輸送過程の質的变化、さらに試料の持ち出し数に対応して、試料に酸処理やろ過等の前処理を行った。質的变化が避けられない栄養塩等については、形態的な分画は行わなかった。

3. 結果および考察

3. 1 水質分析結果

調査対象とした雲南省3湖沼の水質の分析結果を、1988年を例に、表4に示した。高圧滅菌処理による試料の変質によって分析値に若干の矛盾が認められた。例えばTOC (SS) (= TOC (T) - TOC (F) : 有機炭素分析計を使用。) とPOC (= SS × 固形物質中の炭素含量 : CHN元素分析計を使用。) は、本来等しいはずであるが、その懸濁態有機物濃度が高い運穀川や大新河でかなりの差が生じた。これらは区別し、両者の値をそのまま示すことにした。前者を汚染の指標として、後者を懸濁物質の組成分析の解析に用いることとした。全窒素 (TN) は、溶存態窒素 (DN) に懸濁態窒素濃度 (SS × 固形物質中の窒素含量) を加算して計算してある。この分析結果に基づき、表5に炭素、窒素、リンの存在状態別の成分比を、表6には懸濁物質 (SS) 中の炭素 (C)、窒素 (N)、リン (P) およびクロロフィル (Chl-a) の存在割合を、表7に懸濁態炭素 (C)、窒素 (N)、リン (P) のクロロフィル (Chl-a) に対する比を算出して、参考とした。

3. 2 雲南省3湖沼の富栄養化とその特徴

(1) 3湖沼の栄養状態

表8に、3湖沼の富栄養化関連項目の濃度（1988年調査）を、湖心表層（上段）および観測データの平均値と分布幅（下段）として示した。坂本⁵⁾の栄養塩濃度を基本とした湖沼栄養状態の分類を参考にすると、洱海は中栄養湖、杞麓湖と滇池は富栄養湖に分類できる。洱海は、全窒素 (TN) 0.35 mg/l、全リン (TP) 0.010 mg/l、Chl-a 2 μg/lと、富栄養化のレベルは低い。これは森林や農地の集水域に占める割合が60%弱³⁾と高いためであるが、近年の産業活動による汚染の進行が報じられており、また発電や農業用水としての水利用による水位の低下に伴う富栄養化の進行が憂慮されている。現在の水質レベルが保たれるよう、最大限の努力が期待される。杞麓湖の、TN 2.02 mg/l、TP 0.046 mg/l、Chl-a 50.3 μg/lで、富栄養化はかなり進んだ状態にあるといえる。TOCとCOD等の有機物濃度が、TN、TP濃度に比較すると相対的に高く、かなり特異的な生態系にあるといえる。これらの原因は、集水域内からの化学肥料工場を中心とした産業排水や、農地排水や生活排水の流入によるとされており、特に排水の無処理流入が大きな水質汚濁の原因と指摘されている。³⁾ また森林の被覆率低下による土砂の流入が、SS濃度を高め、リンの濃度を高めていると推測されるが、このことは後述する。滇池は、草海で、TN 4.43 mg/l、TP 0.43 mg/lと、いわゆる過栄養のレベルにあり、栄養塩濃度と対応してChl-a 170 μg/lと、藻類の現存量は多い。ホテイアオイの繁茂を見なければ、相当な藻類量になるものと予想される。外海ではTNで 1/5、TPで 1/10 に低下し、Chl-a も30~50 μg/lとなって、水質の浄化が認められる。滇池の水質は、乾期の1

表5 炭素、窒素、リンの形態別成分濃度比（1988年）

湖沼名	地点	採水 m	TN/TC *	TP/TC *	TN/TP *	PN/PC **	PP/PC **	PN/PP **	DN/DC *	DP/DC *	DN/DP
洱海 L.Erhai	F6	0.5	0.126	0.0036	35.4	0.188	0.0063	30.0	0.138	0.0030	45.5
		15.0	0.159	0.0040	40.2	0.187	0.0133	14.0	0.166	0.0033	50.9
	F12	0.5	0.160	0.0063	25.4	0.184	0.0290	6.3	0.152	0.0033	45.5
杞麓湖 L.Qilu	湖心	0.5	0.087	0.0020	43.8	0.108	0.0026	41.3	0.085	0.0019	45.9
滇池 L.Dianchi	D3	0.5	0.396	0.0383	10.3	0.182	0.0346	5.3	0.656	0.0379	17.3
	D8	0.5	0.119	0.0052	22.8	0.159	0.0174	9.1	0.125	0.0024	53.1
		3.0	0.109	0.0046	23.8	0.159	0.0144	11.1	0.118	0.0024	49.8
	D9	0.5	0.125	0.0056	22.4	0.162	0.0190	8.5	0.125	0.0024	53.1

*TOC分析計による。 **元素分析計による。

表6 懸濁物質中の炭素、窒素、リンとクロロフィル
(Chl-a) の割合（1988年）

湖沼名	地点	深さ m	PC/SS	PN/SS	PP/SS	Chl-a/SS
洱海 L.Erhai	F6	0.5	0.123	0.023	0.0008	0.0017
		15.0	0.101	0.019	0.0014	0.0021
	F12	0.5	0.129	0.024	0.0038	0.0017
杞麓湖 L.Qilu	湖心	0.5	0.224	0.024	0.0006	0.0014
滇池 L.Dianchi	D3	0.5	0.151	0.028	0.0052	0.0064
	D8	0.5	0.142	0.023	0.0025	0.0028
		3.0	0.132	0.021	0.0019	0.0028
	D9	0.5	0.123	0.020	0.0023	0.0017
新河 R.Xinhe			0.113	0.013	0.0200	
運轂川 R.Yunlianghe			0.148	0.025	0.0079	
盤竜江 R.Panlong			0.041	0.005	0.0010	
大清河 R.Daqinghe			0.201	0.038	0.0836	
洛竜河 R.Luolonghe			0.018	0.002	0.0004	

表7 懸濁態炭素、窒素、リンとクロロフィル
(Chl-a) の濃度比（1988年）

湖沼名	地点	深さ m	Chl-a/PC ×1000	Chl-a/P ×1000	Chl-a/PP ×1000
洱海 L.Erhai	F6	0.5	13.75	73.3	2200.0
		15.0	20.67	110.7	1550.0
	F12	0.5	12.90	70.2	444.4
杞麓湖 L.Qilu	湖心	0.5	6.09	56.3	2326.1
滇池 L.Dianchi	D3	0.5	42.10	231.3	1217.9
	D8	0.5	19.94	125.6	1144.4
		3.0	20.94	131.4	1456.5
	D9	0.5	13.67	84.5	717.9

表8 調査3湖沼の富栄養化関連成分濃度
(上段：湖心<表層部>、下段：平均値，最大値－最小値（試料数）)

		洱海 F6	杞麓湖	滇池 草海(D3)	外海(D8)
TN	mg/l	0.35	2.02	4.43	0.98
		0.44,0.48-0.35(3)			0.96,0.98-0.94(3)
TP	mg/l	0.010	0.046	0.43	0.043
		0.014,0.019-0.010(3)			0.042,0.043-0.040(3)
Chl-a	μg/l	2.2	53.5	170.5	30.9
		3.0,4.0-2.2(3)			28.2,33.5-20.1(3)
TOC	mg/l	2.8	23.3	11.2	8.2
		3.0,3.0-2.8(3)			8.2,8.7-7.5(3)
COD	mg/l	3.4	20.8	13.3	10.9
		3.5,3.9-3.3(3)			10.3,10.9-9.2(3)
SS	mg/l	1.3	39.2	26.8	10.9
		1.7,2.4-1.3(3)			11.7,12.1-10.9(3)
栄養レベル		中栄養湖	富栄養湖	富栄養湖	

989年調査でも、草海を中心に若干濃度レベルが高かったが、ほぼ同ような特徴を示した。

(2) 栄養塩の組成

滇池の草海のN/Pが、形態に関わらず最小を示すが、TN/TPで10に近いことから、生活排水が栄養塩の供給源であることを裏付けている。一方洱海や杞麓湖のN/Pが大きく、農地や山地に栄養塩の起源があることが推測される。懸濁物質の組成としては、滇池の草海でSS中のChl-aや懸濁態栄養塩含量比が高く懸濁物質が生物体で構成されていること、杞麓湖では懸濁態炭素(POC)含量が多くリン含量が少ないなど、高い溶存有機物質(TOC(F)、COD(F))濃度と対応した特殊な環境にあることがわかる。杞麓湖ではChl-a/POCが小さいが、このことは土壌流出が問題になっていることと対応しているように思われる。

(3) 一般無機イオン組成からみた湖沼水質

図4に1988年調査、図5は1989年調査によって描いたキーダイアグラムである。1988年の調査では、アルカリ度を測定できなかったため、イオンバランスから算出した。図4から、洱海は典型的なアルカリ土類炭酸塩型の特異的な水質であることがわかる。これは、大理石が産出されるように洱海の集水域が炭酸塩層の分布域にあるためといえる。このことは特異な生態系の形成と関連するかも知れず、水質保全が望まれる理由の一つでもある。図4と図5から、滇池の水質は、流入5河川の囲む範囲(点線内)にあり、湖沼水質が質の異なる多くの河川の流入によって決定されていることがわかる。必ずしも流量の多い少数の河川の影響ばかりではない。現在の湖沼内の水質浄化に対し、集水域からの流入する河川水の希釈効果は大きいと推測され、集水域の開発に十分な配慮が必要ながわかる。

3.3 滇池の富栄養化と水質浄化

(1) 滇池の富栄養化と流入河川水質

滇池の富栄養化は、まさしく昆明市の都市・産業活動の結果であることは紛れもない事実である。運穀川や大清河等では、20~30mg/lの窒素濃度、1~5mg/lのリン濃度で、都市内の大排水溝といってよい。CODについても、新河で50mg/l(1989年調査)を越え、排水による直接的な有機汚染も無視できない。

滇池の富栄養化の機構を明らかにし制御するためには、まず流入してくる汚濁負荷の実態を把握し、その湖沼水質との関連を明らかにしておくことが必要である。表9は、流入河川についての流量データが利用できる1988年調査に基づき、流入河川の水質成分流出負荷量/Σ流量と湖沼水質との比率を計算したものである。R1は草海流入河川水質(新河、運穀川)に対する草海水質(D3地点)の比、R2は調査した流入5河川の水質成分流出負荷量/Σ流量に対する外海水質(D9地点)の比である。R3は外海水質(D9地点)に対する草海水質(D3地点)の比である。表10には水質変化の大きいRが1.5以上(濃度の著しい増加)のものと、0.5以下(濃度の著しい減少)のものをまとめて示してある。R1から、草海内では、DOの増加とCOD(F)や全有機炭素(TOC(T))の著しい減少にみられるように有機汚濁と関連した水質の浄化作用が認められる。TPとPPの減少、すなわち沈降によると思われる自浄作用も認められる。草海では富栄養化による藻類の大増殖がみられるが、マクロ的には水質の浄化作用も評価できる。R2から、外海では、SS、POC、PPの減少(沈降作用)や、溶存態窒素(DN)や溶存態リン(DP)濃度の減少(生物による摂取)が認められる。また無機イオンの増加によって非特定河川の流入による水質変化も推測される。R3からは、流れにしたがって、酸素濃度の回復や、沈降などによる懸濁物質(SS)や栄養塩の減少が認められる。滇池は確かに汚れてはいるが、大きな浄化能力をみせる湖沼でもある。滇池の池の富栄養化が下流水質の劣化を防いでいるともいえる。

(2) 滇池内の窒素、リン成分の挙動と水質浄化

1989年の調査結果(乾期)に基づいて、図6にD1~D9に至るTOC(T)、TN、TPおよびChl-a濃度の変化を、図7にTN/TP、DT/DPおよびPN/PPの変化を示した。流出口への流れに従って、窒素、リンそしてChl-a濃度が減少する。栄養塩濃度が藻類生産と密接に関係しているが、浄化

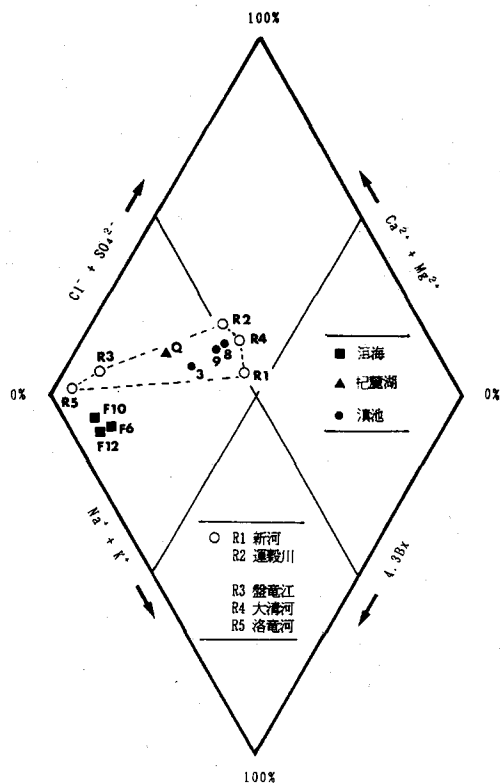


図4 キーダイヤグラム
(1988年、沼海、杞麓湖、滇池(含流入河川))

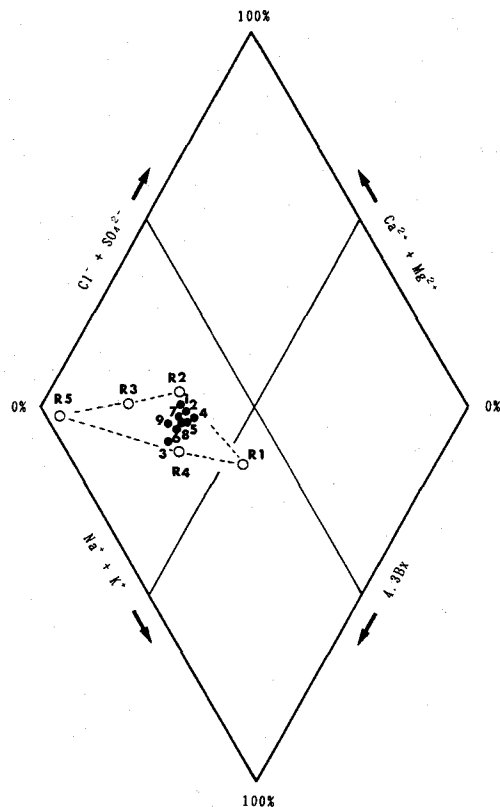


図5 キーダイヤグラム
(1989年、滇池(含流入河川))

表9 流入河川平均水質(Σ水質成分流出負荷量/Σ流量)と湖沼水質の濃度比
(1988年、滇池 St.D3、D9)

	深さ m	流量 m³/s	EC ①~④μS/cm	DO	SS	COD(T)	COD(F)	COD(SS)	TOC(T)	TOC(F)	TOC(SS)	TN*	DN
水質負荷	g/s	4.10	3270	3.9	142.6	109.29	79.6	29.7	113.5	83.0	30.5	30.96	28.44
① 平均濃度*(草海)	mg/l		798	1.0	34.8	26.7	19.4	7.3	27.7	20.2	7.4	7.552	6.937
② 草海 D3	0.5		524	2.9	26.8	13.3	7.6	5.7	11.2	5.6	5.6	4.428	3.691
R1 (②/①)			0.66	3.02	0.77	0.50	0.39	0.78	0.40	0.28	0.75	0.59	0.53
水質負荷	g/s	46.10	16023	216.2	3002.5	372.5	266.0	106.4	418.9	246.4	172.5	169.30	148.28
③ 流入平均濃度*	mg/l		348	4.7	65.1	8.1	5.8	2.3	9.1	5.3	3.7	3.672	3.216
④ 外海 D9	0.5		387	7.4	12.0	9.2	6.0	3.3	7.5	5.6	1.9	0.942	0.704
R2 (④/③)			1.11	1.58	0.18	1.14	1.03	1.43	0.83	1.05	0.51	0.26	0.22
R3 (④/②, D9/D3)			0.74	2.55	0.45	0.70	0.78	0.58	0.67	1.00	0.34	0.21	0.19
	深さ m	TP	DP	POC	PON	PP*	Cl⁻	SO42⁻	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	Si
水質負荷	g/s	3.73	1.55	18.12	2.52	2.18	342.5	323.4	262.4	53.0	281.4	68.2	19.1
① 平均濃度*(草海)	mg/l	0.909	0.377	4.42	0.615	0.532	83.5	78.9	64.0	12.9	68.6	16.6	4.7
② 草海 D3	0.5	0.428	0.288	4.05	0.737	0.140	45.6	41.2	33.5	9.7	56.2	14.2	3.3
R1 (②/①)		0.47	0.76	0.92	1.20	0.26	0.55	0.52	0.52	0.75	0.82	0.85	0.70
水質負荷	g/s	21.82	3.19	158.52	21.02	18.62	827.0	858.4	573.3	170.8	1519.9	382.9	127.6
③ 流入平均濃度*	mg/l	0.473	0.069	3.44	0.456	0.404	17.9	18.6	12.4	3.7	33.0	8.3	2.8
④ 外海 D9	0.5	0.042	0.014	1.47	0.238	0.028	38.3	43.3	26.7	7.0	28.2	17.4	0.3
R2 (④/③)		0.09	0.20	0.43	0.52	0.07	2.13	2.33	2.15	1.89	0.86	2.09	0.11
R3 (④/②, D9/D3)		0.10	0.05	0.36	0.32	0.20	0.84	1.05	0.80	0.73	0.50	1.23	0.09

表10 流入河川平均水質と湖沼水質の濃度比(R)

	R > 1.5	R < 0.5
R1 (②/①)	DO	COD _{Mn} , TOC _r , TP, PP
R2 (④/③)	DO, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺	SS, TN, DN, TP, DP, PP, POC
R3 (D9/D3)	DO	SS, TOC(SS), TN, DN, TP, DP

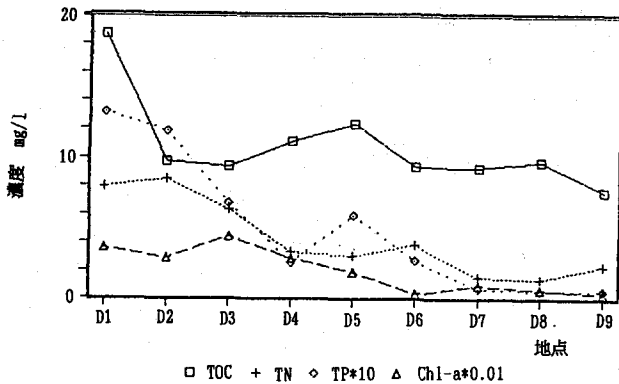


図6 有機炭素、全窒素、全リンとクロロフィル濃度の地点変化(1989年、滇池)

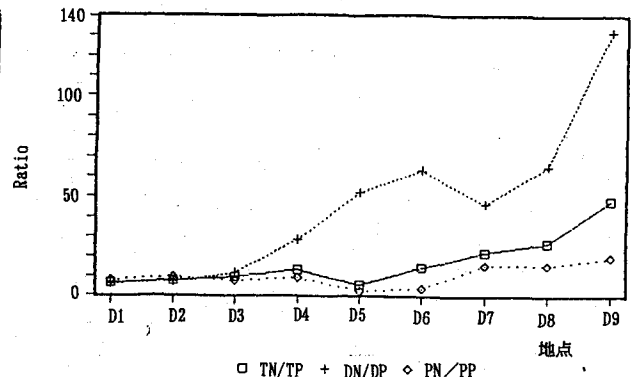


図7 各態栄養塩濃度比の地点変化(1989年、滇池)

作用や3.2(3)で述べたように希釈作用によって徐々にその濃度を減ずることがわかる。N/Pから、草海(D1~D5)では10程度かそれより若干低くリンの割合が高いが、下流では15付近で生物体として安定して存在することがわかる。溶存態としては50以上、流出口(D9)では132にもなり、水中溶存リンが藻類に摂取されたりして懸濁物質に移行していくようすがわかる。草海における過剰な栄養塩濃度と藻類の異常増殖は、流れにしたがって藻類を中心とした安定した生態系と栄養塩の存在状態になって行く。滇池では、TOC(T)の濃度が高くまた変化も小さく、藻類生産によらない有機汚染も大きな水質問題としてとりあげることができる。

4. 結論

湖沼の富栄養化は、近年の世界共通の水環境の問題である。ここでは中国運南省の3湖沼の富栄養化の状況を紹介し、滇池については流入河川水質との関連において解析した。現地での聞き取りから、いずれの湖沼においても、最近の工業化や農業政策と関連して、急速に富栄養化が進行したといえる。調査した湖沼は、水質的に個性があり、またさまざまな目的で利用されている。しかし水の自浄能力が機能している今の時点で措置を取らないと、将来に禍根を残すことになる。中国政府、雲南省、各都市で精力的に汚染防止対策が計画されており、成果が期待される。

本研究は、中国環境科学研究院との共同研究であり、計画から現場観測まで中国側の多大な協力があつた。ここに記して謝意を表します。

(参考文献)

- (1) Morihiro Aizaki and Harukuni Tachibana (edited) Limnological Comparison of Characteristics of Water Quality in Chinese and Japanese Lakes (Proceedings of the Symposium on Limnological Comparison of Chinese and Japanese Eutrophic Lakes at Hokkaido University, 1990(July)), 159 pages, 1991(March)
- (2) Takehiko Fukushima, Hideo Harasawa, Morihiro Aizaki, Harukuni Tachibana and Kohji Muraoka: Lake Comparative Study and Its Application to Management of Drainage Basin, Lake Conservation and Management (Edited by Liu Hongliang, Zhang Yutian, Li Haisheng, <CRAES-UNEP-ILEC> Proceeding of the 4th International Conference on the Conservation and Management of Lakes "Hangzhou'90"), p444-468, 1992
- (3) Jin Xiangcan, Liu Hongliang, Tu Oligying, Zhang Zongshe and Zhu Xuan Eutrophication of Lakes in China, the 4th International Conference on the Conservation and Management of Lakes "Hangzhou'90" and CRAES, 652 pages, 1990
- (4) 雲南高原湖沼資源不合理開發利用的生態後果調研課題組 雲南高原「四湖」の生態問題與生態後果、雲南科技出版社、148頁、1987
- (5) M. Sakamoto, Arch. Hydrobiol., 62, 1-28, 1966

注1) 研究代表者: 1988年、1989年村岡浩爾、1990年相崎守弘

注2) 雲南省、大理自治州及び昆明市の環境保護局等行政・研究機関