

上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究

李贺, 李田*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 城市面源污染已成为上海城区河道的主要污染源. 为此, 研究了上海市合流制排水区域 SA 雨天溢流的水质特性, 并探讨了溢流水质的主要影响因素. 结果表明, 该区域雨天溢流 COD、BOD、SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 事件平均浓度的均值分别为 614 mg/L、208.5 mg/L、684 mg/L、17.6 mg/L、29.8 mg/L、3.0 mg/L, 远高于国外的一些研究结果; 分析事件平均浓度的对数正态概率分布表明, BOD 的对数正态分布性最好; 此外, 研究还发现 COD 和 SS 溢流浓度和前期晴天数与降雨历时的比值呈现出较高的正相关性.

关键词: 城市面源污染; 合流制溢流; 事件平均浓度; 对数正态分布; 相关性分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1565-05

Study on the Characteristics of Combined Sewer Overflow from the High Density Residential Area in Shanghai

LI He, LI Tian

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The urban nonpoint pollution has become main pollution resource of urban water bodies of Shanghai. Character of combined sewer overflow from watershed SA in Shanghai was studied, and the correlation of influence factors to the EMCs of overflows was discussed. It is found that the EMCs of COD、BOD、SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP are 614 mg/L、208.5 mg/L、684 mg/L、17.6 mg/L、29.8 mg/L、3.0 mg/L respectively, and the values obtained herein are much higher than the documented data from other countries. From the probability plot of the EMCs, it is found that the BOD has the best fitness for lognormal distribution; and correlation between the EMCs of COD、SS and the ratio of antecedent dry weather time to rain duration is quite good.

Key words: urban nonpoint pollution; combined sewer overflow; EMC; lognormal distribution; correlation analysis

随着点源污染逐步得到有效控制, 面源污染已成为上海市的主要污染源. 为了控制城市面源污染, 美国环保局(EPA)率先展开了雨水径流污染的调查研究^[1]. 研究不但给出了雨水径流污染的数值范围, 而且还提供了合理的数据分析方法. 随后, 国外学者对此展开了广泛的研究和探讨^[2~10], 积累了大量实测数据, 为应用工程性控制措施提供了依据. 而我国在该领域鲜有研究报道. 本文通过对代表性排水系统的考察, 研究上海市合流制排水系统雨天溢流的水质特性, 并分析影响溢流水质的主要因素, 以期为我国城市面源污染的研究和控制提供有价值的参考.

1 材料与方法

以上海市杨浦区某截流式合流制排水系统 SA 为研究对象. 表 1 列出了该区域的基本情况以及由航拍图统计的该区域下垫面情况. 该区域内建筑主要是上世纪 80 年代建造的多层住宅, 属于高密度居民区. 区域内约有 276 座化粪池, 其上清液均排入管道系统. 由于地面高程低, 该区域污水截流输送与雨

天溢流都要通过水泵提升. 该区域排水系统对上海市同一时代建造的居民区具有广泛的代表性.

样品的采集主要由人工在该系统的泵站前池进行. 自溢流开始到结束, 按一定时间间隔采集水质过程线样品, 并放入 1L 的水样瓶中. 采集后的水样瓶储存于 4℃ 的冰柜中待分析. 水样检测分析时, 化学需氧量采用哈希公司 DR/2010 型 COD 测定仪, 其它水质指标均按国标方法测定.

区域雨量数据以及泵站流量数据由泵站 SCADA 系统获得. SCADA 系统每 5min 采集一次信号, 经 RTU 传输到上海市城市排水公司控制室. 从累计降雨量和降雨时间可计算得出相应时段的降雨强度; 泵站排江泵的启、闭信号也由 SCADA 系统同步采集, 再根据各台水泵的铭牌流量和运行时间计算得到各时段溢流过程的总流量.

收稿日期: 2005-11-29; 修订日期: 2006-01-04

基金项目: 上海市科委重大项目(04dz12024)

作者简介: 李贺(1978~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: lihe_tj@126.com

* 通讯联系人

表 1 SA 排水区域的基本情况

Table 1 Summary of studied watershed characteristics

区域 类型	区域面积 /hm ²	人口密度 /人·hm ⁻²	管道坡度 / %	屋面比例 / %	路面比例 / %	绿地比例 / %	综合径 流系数
合流制	144	370	0.15	43.8	45.6	10.6	0.76

2 结果与讨论

2.1 泵站运行状况

SA 系统的截流式合流制泵站运行方式,分为晴天模式和降雨模式 2 种.根据泵站前池水位的高低来控制截流泵和排江泵的启闭.表 2 给出了泵站晴天和降雨模式下的运行水位.晴天时启动截流泵,按照晴天模式的水位控制截流泵运行.雨天或预报有雨时,按照降雨模式的水位控制截流泵运行.当雨天达到溢流水位时,为了保证截流总管的输送能力,关闭截流泵,开启排江泵,按照降雨模式的水位来控制排江泵运行.

表 2 泵站运行水位/m

Table 2 Operational water-level of pump station/m

模式	截流泵		排江泵	
	开泵水位	关泵水位	开泵水位	关泵水位
晴天模式	1.50	- 1.50	—	—
降雨模式	1.00	- 2.20	2.70	- 1.30

晴天时平均旱流污水量为18 950m³/d.图 1 给出了实测泵站旱流污水污染物浓度的变化过程.从图 1 可以看出,泵站旱流污水 COD 的浓度大致在 250~ 350 mg/L,SS 在 150~ 250 mg/L. SS 相对较低与部分污水通过化粪池排放有关.

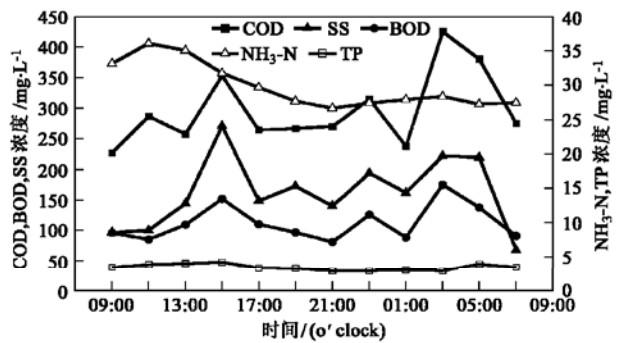


图 1 泵站旱流污水污染物浓度的变化
Fig. 1 Pollutograph of dry weather flow

2.2 溢流水质的变化过程

图 2~ 4 给出了 SA 区域 3 种典型情况下溢流过程的水质变化.图 2 是该区域很长时间没有发生溢流事件时的情况.可以看出,整个溢流过程污染物

浓度始终非常高,其中 COD 最高达2 500mg/L,SS 最高接近3 000mg/L.这主要是溢流雨水携带了大量的路面污染物和管道沉积物所致.图 3 是较为常见的溢流过程中的情况.污染物浓度随着溢流时间的延续逐渐降低直至稳定,稳定后 COD 在 300~ 400 mg/L, BOD 在 100~ 200 mg/L, SS 在 300~ 400 mg/L.图 4 给出了台风影响上海市时,SA 区域发生溢流的情况.可以看出在溢流达 3h 后,水质才明显好转.这表明只有在特大暴雨和发生长时间连续溢

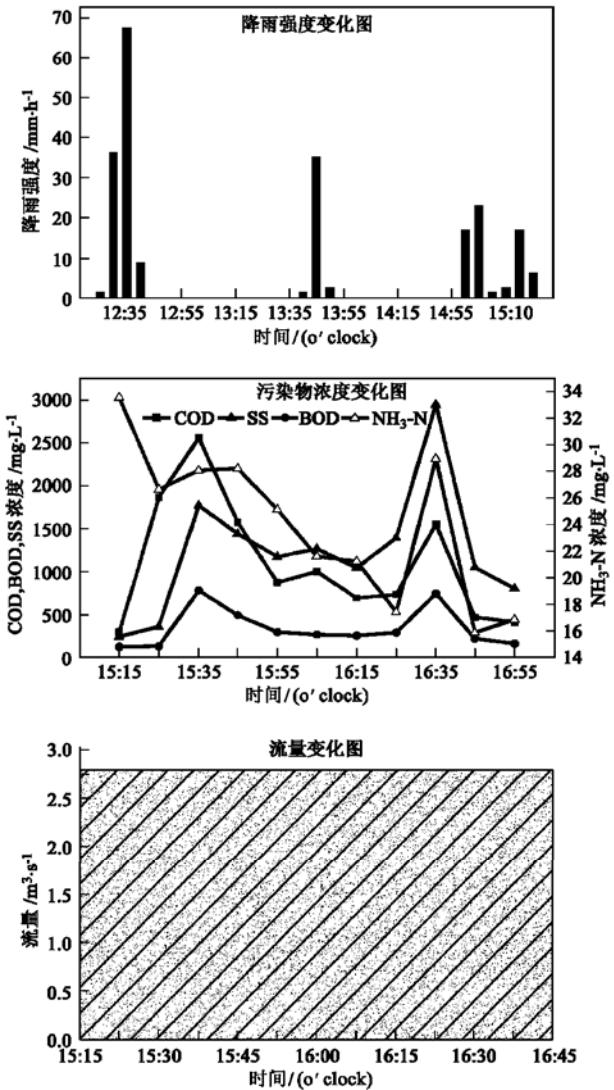


图 2 2005_06_27 SA 系统溢流水质变化过程
Fig. 2 Pollutographs of combined sewer overflows
from SA at 2005_06_27

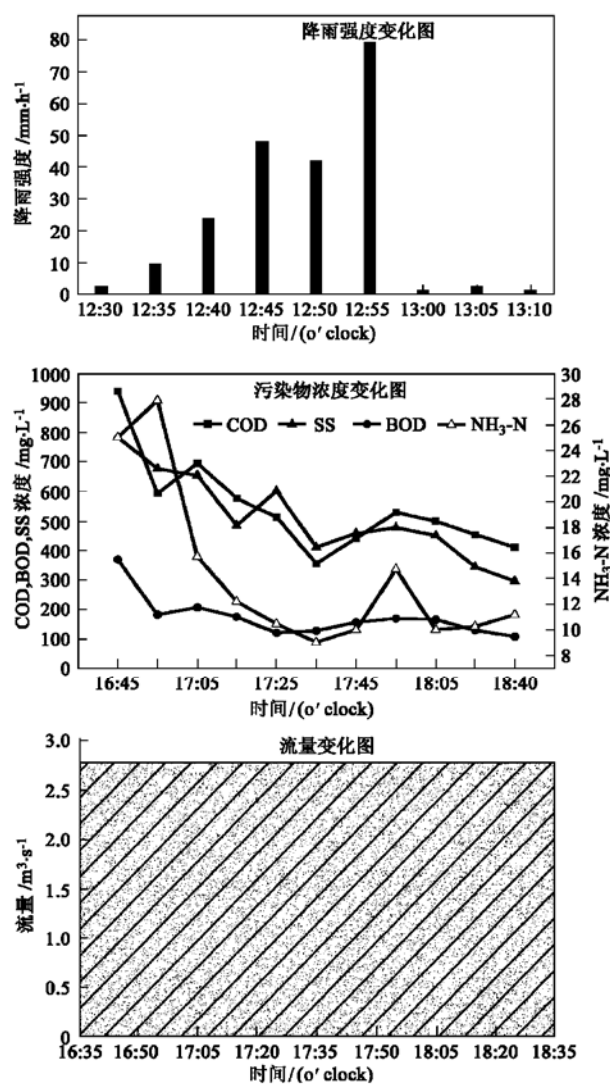


图 3 2005-09-21 SA 系统溢流水质变化过程

Fig. 3 Pollutographs of combined sewer overflows from SA at 2005-09-21

流的情况下, SA 区域的溢流水质才能达到比较低的值, COD SS 都在 100 mg/L 以下, 低于其旱流污水的浓度。

2.3 溢流污染物的事件平均浓度

由于同一场降雨过程中污染物浓度变化很大, 因此用事件平均浓度(EMC)能够更好地表征降雨事件的污染特征^[1]。EMC 为整个溢流过程的流量加权平均浓度, 其表达式为:

$$EMC = \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int c(t) Q(t)}{\int Q(t)} \approx \frac{\sum c(t) Q(t)}{\sum Q(t)} \quad (1)$$

其中: M 为径流全过程某一污染物总量; V 为相应的径流总体积; $c(t)$ 为随径流时间而变化的某

污染物浓度; $Q(t)$ 为随径流时间而变化的径流流量; T 为总的径流时间。

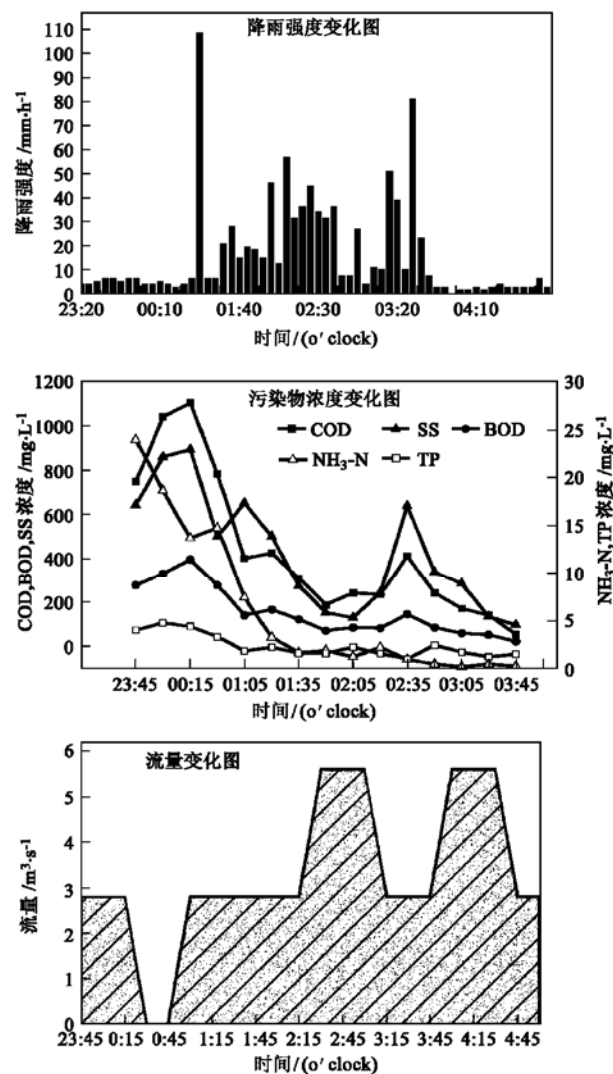


图 4 2005-09-11 SA 系统溢流水质变化过程

Fig. 4 Pollutographs of combined sewer overflows from SA at 2005-09-11

根据公式(1)可以计算出每次溢流事件的各个污染物的 EMC。表 3 给出了 SA 系统 2005 年 8 次溢流事件主要污染物的 EMC 以及相应的降雨特性。与图 1 比较可知, 除了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 TP 之外, 其它溢流污染物的 EMC 均高于旱流污水的浓度。

用对数正态概率分布图能够更直观地表示出污染物 EMC 的范围、随机性以及正态性^[1]。图 5 为不同污染物质 EMC 的对数正态概率分布图, 该图应用 Anderson-Darling 统计值(AD 值)进行统计。从图 5 可以看出, SA 区域的雨天溢流事件中, COD 和 SS 的浓度较高, TP 的浓度最低。由统计学可知, AD 值越小说明各个点与概率分布直线的拟合程度越好,

即其对数正态分布性越好,从而表明该污染物越适合用对数正态分布来表征.研究污染物 EMC 的对数正态分布不仅可以计算出污染物浓度的范围和极值,而且还为城市径流水质经验模型的建立提供了必要的数据库^[10].由图 5 可知,各污染物按

AD 值由小到大排列可得: BOD (0.291) < TP (0.292) < TN(0.355) < COD(0.518) < SS(0.560) < NH₃-N(0.657),即各污染物 EMC 的对数正态分布性逐渐变差.与美国的研究相比,主要是 BOD 的对数正态分布性明显好于其调查结果^[1].

表 3 SA 区域污染物 EMC 和降雨特性

Table 3 EMC and rainfall characteristics of SA

次数	COD /mg·L ⁻¹	NH ₃ -N /mg·L ⁻¹	SS /mg·L ⁻¹	BOD /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	累积降雨量 /mm	前期晴天数 /h
1	1 205.8	24.2	1 321.5	370.8	—	—	18.1	384
2	538.5	13.9	498.7	169.9	—	—	41.6	24
3	417.0	18.6	466.1	163.0	25.1	1.0	15.5	240
4	428.6	30.7	644.3	186.2	38.8	3.6	8.5	44
5	314.1	15.7	464.9	98.5	25.0	2.7	23.1	24
6	1 097.5	19.5	1 139.7	344.9	30.3	5.2	11.3	408
7	368.1	3.9	380.6	130.6	—	2.2	73.6	168
8	540.8	14.7	558.8	203.8	—	3.5	31.8	240

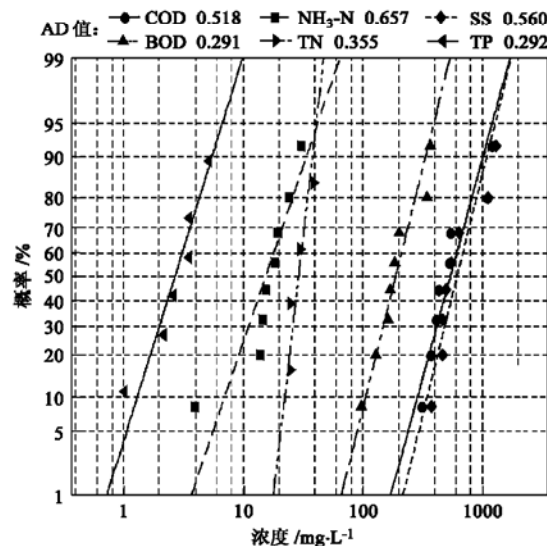


图 5 污染物 EMC 对数正态概率分布图

Fig. 5 Probability plot of lognormal distribution for EMCs

表 4 SA 系统溢流污染物 EMC 的统计值

Table 4 Statistical EMC of combined sewer overflow from SA

项目	均值 /mg·L ⁻¹	变差 系数	最小值 /mg·L ⁻¹	中值 /mg·L ⁻¹	最大值 /mg·L ⁻¹
COD	614.0	0.56	314.1	484.0	1 205.8
NH ₃ -N	17.6	0.44	3.9	17.2	30.7
SS	684.0	0.51	380.6	529.0	1 321.5
BOD	208.5	0.47	98.5	178.1	370.8
TN	29.8	0.22	25.0	27.7	38.8
TP	3.0	0.47	1.0	3.1	5.2

表 4 给出了表 3 得出的各污染物 EMC 的常用统计值.将表 4 的统计值与国外相应的研究结果进行比较可知,SA 区域各主要污染物雨天溢流的

EMC 远远高于德国合流制溢流的调查结果^[2]: NH₃-N 为调查结果的 6~8 倍, COD、SS、BOD、TP 为 3~4 倍;与韩国的研究结果相比^[11],除 TP 略低于其研究结果外,其它主要污染物均高于其合流制排水区域的溢流浓度.这主要是由于 SA 区域的人口密度远高于国外的排水区域,频繁的人为活动导致地表污染物数量增加,使得区域污染物溢流浓度增加.另外,SA 区域管道坡度较小,旱流污水流速低,加之晴天控制水位较高,这加速了管道沉积物的累积,从而导致雨天溢流浓度的增加.这表明国外相应的研究结果与我国的实际情况有较大的差别,因此,国外现有的控制措施与设计规范不一定适用于我国高人口密度区域.

2.4 溢流水质影响因素的相关性探讨

影响合流制排水区域雨天溢流水质的因素主要包括旱流污水的水量 and 水质、排水区域的特性(人口密度、用地类型等)、环境特性(区域的气候、季节等)、降雨特性(前期晴天数、降雨强度等).本文对 COD 和 SS 溢流浓度的影响因素进行了相关性分析.相关系数见表 5.表 5 括号内为 *p* 值,其值越小说明两者的相关性越稳定.从表 5 可以看出, COD 和 SS 溢流浓度与降雨强度、前期晴天数、前期未溢流时间与溢流历时的比值以及前期晴天数与降雨历时的比值都呈现正相关,其相关性依次升高,稳定性也逐渐变高;这与新加坡学者 Chui 对前期晴天数和降雨强度的影响研究结果一致^[12];其中前期晴天数与降雨历时的比值不仅呈现出相当高的相关性,而且稳定性也很高.这表明前期晴天数与降雨历时的

表 5 溢流浓度与影响因素的相关性
Table 5 Correlation of EMC and influencing variable

项目	降雨强度/mm·h ⁻¹	前期晴天数/h	前期未溢流时间/溢流历时	前期晴天数/降雨历时
COD	0.791(0.034)	0.815(0.014)	0.826(0.022)	0.953(0.001)
SS	0.659(0.107)	0.756(0.030)	0.802(0.030)	0.935(0.002)

比值不仅可以作为具有可比性的溢流事件特征量,还可以作为影响污染物溢流浓度的一个重要因子.

3 结论

(1) 所研究区域雨天溢流 COD、BOD、SS、NH₃-N、TN、TP 事件平均浓度的均值分别为 614 mg/L、208.5 mg/L、684 mg/L、17.6 mg/L、29.8 mg/L、3.0 mg/L,远远高于国外的一些研究结果.

(2) 污染物 EMC 的对数正态分布性按 BOD>TP>TN>COD>SS>NH₃-N 顺序逐渐降低.

(3) 对溢流水质影响因素的相关性分析表明, COD 和 SS 溢流浓度与前期晴天数与降雨历时的比值不仅呈现出相当高的相关性,而且稳定性也很高.此外,前期晴天数与降雨历时的比值不仅可以作为具有可比性的溢流事件特征量,还可以作为影响污染物溢流浓度的一个重要因子.

参考文献:

[1] US EPA. Results of the national urban runoff program. Final Report (Vol. 1) [R]. Washington DC: US EPA Water Planning Division, 1983.

[2] Brombach H, Weiss G, Fuchs S. A new database on urban runoff pollution: comparison of separate and combined sewer systems [J]. Wat. Sci. Tech., 2005, **51**(2): 119~ 128.

[3] Suarez J, Puertas J. Determination of COD, BOD, and suspended solids loads during combined sewer overflow (CSO) events in some combined catchments in Spain [J]. Ecological Engineering, 2005, **24**(3): 201~ 219.

[4] Uchimura K, Nakamura E, Fujita S. Characteristics of stormwater runoff and its control in Japan [J]. Wat. Sci. Tech., 1997, **36**(8-9): 141~ 147.

[5] McPherson T N, Burian S J, Turin H J, *et al.* Comparison of the pollutant loads in dry and wet weather runoff in a Southern California urban watershed [J]. Wat. Sci. Tech., 2002, **45**(9): 255~ 261.

[6] Mulliss R M, Revitt D M, Shutes R B. The impacts of urban discharges on the hydrology and water quality of an urban watercourse [J]. The Science of the Total Environment, 1996, **189/190**: 385~ 390.

[7] Ichiki A, Hall K J, Maruta Y, *et al.* Comparison of pollutant runoff in Lake Biwa tributaries Japan and Brunette River watershed, Canada [J]. Wat. Sci. Tech., 2001, **44**(7): 69~ 76.

[8] Diaz Fierros T F, Puertas J, Suarez J, *et al.* Contaminant loads of CSOs at the wastewater treatment plant of a city in NW Spain [J]. Urban Water, 2002, **4**(3): 291~ 299.

[9] Hall K J, McCallum D W, Lee K, *et al.* Characterization and aquatic impacts of combined sewer overflows in Greater Vancouver, British Columbia [J]. Wat. Sci. Tech., 1998, **38**(10): 9~ 14.

[10] Sztruhár D, Sokác M, Holiencin A, *et al.* Comprehensive assessment of combined sewer overflows in Slovakia [J]. Urban Water, 2002, **4**(3): 237~ 243.

[11] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. Wat. Res., 2000, **34**(6): 1773~ 1780.

[12] Chui P C. Characteristics of stormwater quality from two urban watersheds in Singapore [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1997, **44**(1-3): 173~ 181.