

天津市某污水处理厂出水中贾第虫和隐孢子虫含量及其潜在健康危害

肖淑敏^{1,2}, 赵晓芸¹, 张岩¹

摘要: [目的] 了解天津某郊野公园补给河流纳入的处理后污水中贾第虫和隐孢子虫(简称“两虫”)的浓度水平及其对人群潜在的健康危害。[方法] 于2014年3—7月每2周对补给河流上游A污水处理厂出水进行采集,共采集9份样品。水样经沉淀浓缩、密度梯度纯化、免疫荧光染色后经荧光显微镜检测“两虫”,测定其浓度。采用定量微生物风险评价法对人群通过绿地灌溉和湖泊玩耍暴露于“两虫”的潜在健康危害进行评价。[结果] 出水中均能检测出“两虫”,其中浓度范围分别为11~53包囊/L和0~20卵囊/L。在常规氯消毒后排放时,贾第虫和隐孢子虫的年感染概率分别为 5.69×10^{-3} 和 2.46×10^{-3} ,均高于美国环境保护署地表水处理法规定的 1.0×10^{-4} 。若采用紫外线或臭氧进行消毒,其感染“两虫”的概率为 2.75×10^{-5} 。[结论] A污水处理厂出水中均能检出“两虫”,其浓度水平与国内外报道的污水处理厂相当。处理后的水经氯消毒后排放至河流经灌溉绿地或湖泊玩耍接触人群,存在感染“两虫”的潜在健康危害。出厂水若采用紫外线或臭氧消毒则可降低“两虫”对人群的健康危害。

关键词: 出水; 贾第虫; 隐孢子虫; 健康风险评价; 污水处理厂

Concentrations and Potential Risks of *Giardia* and *Cryptosporidium* in Effluent of a Wastewater Treatment Plant in Tianjin XIAO Shu-min^{1,2}, ZHAO Xiao-yun¹, ZHANG Yan¹ (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2.Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China) • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract: [Objective] To detect the concentrations of *Giardia* and *Cryptosporidium* in treated effluent feeding a tributary river in a suburb park in Tianjin and their potential health risks. [Methods] Water samples ($n=9$) were collected every two weeks from a wastewater treatment plant upstream of a tributary river in March to July 2014. *Giardia* and *Cryptosporidium* concentrations were measured following a method involving flocculation, flotation with density gradient, immunofluorescence stain, and counting under microscope. Quantitative microbial risk assessments on *Giardia* and *Cryptosporidium* exposure via greenland irrigation and playing with water were performed based on their concentrations in effluent. [Results] Both *Giardia* and *Cryptosporidium* were detected in the water samples. The concentration of *Giardia* in the effluent was between 11 to 53 cysts/L, while that of *Cryptosporidium* was between 0 to 20 oocysts/L. The annual infection rates caused by *Giardia* and *Cryptosporidium* in effluent treated by chlorination were estimated to be 5.69×10^{-3} and 2.46×10^{-3} , respectively. Both of them were higher than the reference risk level (1.0×10^{-4}) suggested by the United States Environmental Protection Agency. In contrast, the annual infection rates caused by *Giardia* or *Cryptosporidium* in effluent treated by UV or ozone were both 2.75×10^{-5} . [Conclusion] *Giardia* and *Cryptosporidium* are detected in the treated effluent of the waste water treatment plant in Tianjin and their concentrations are similar to prior domestic and international studies. The effluents treated by chlorination still pose potential health risks to people through greenland irrigation or water playing. UV or ozone treatment could reduce the risk of human exposure to *Giardia* and *Cryptosporidium*.

Key Words: effluent; *Giardia*; *Cryptosporidium*; health risk assessment; wastewater treatment plant

DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2015.14585

[基金项目] 国家自然科学基金(编号: 51278174); 天津城建大学科研启动基金(编号: 70-1302); 天津市“131”第二层次人才培养计划项目

[作者简介] 肖淑敏(1979—), 男, 博士, 副教授; 研究方向: 环境微生物; E-mail: xiaoshumin@tcu.edu.cn

[作者单位] 1.天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384; 2.天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384

城市污水再生回用是目前解决我国淡水资源短缺的重要手段之一。由于城市污水主要来源于人类生活污水, 存在较高浓度的病原微生物, 种类多达100种以上。贾第虫和隐孢子虫(简称“两虫”)是其中两类严重危害水质安全的病原微生物, 因其对常用消毒剂有很强的耐受力, 而水处理工艺又难以将其完全去

除,因此受到广泛关注^[1-5]。污水处理后残留的“两虫”,可随着补给水源水、景观灌溉、工业冷却和市政杂用等进入环境,进而可能与人体接触,产生健康危害。目前,针对环境水中病原微生物的健康危害研究多侧重于细菌性病原微生物,对“两虫”的研究尚未全面深入,在国内则更缺少这方面的报道。本研究对天津A污水处理厂出水进行“两虫”调查,并采用定量微生物风险评估方法对不同消毒模式下经“两虫”感染的健康危害进行评价。

1 对象与方法

1.1 样品采集

对天津市A污水处理厂出水水样进行采集。该污水处理厂原水为城市污水,采用初沉-厌氧-好氧-二沉-加氯消毒工艺,平均每天处理水量63万m³。出厂水排入河道,该河道为附近郊野公园的主要补给水源。于2014年3—7月,每2周采集处理后出水10L,于24h内运抵实验室,4℃冷库保存。96h内完成水样浓缩、纯化、染色,中间暂停时于4℃黑暗保存。染色后48h内使用荧光显微镜(日本Olympus公司,BX53型)完成“两虫”检测。共检测9份样品。

1.2 检测方法

采用碳酸钙沉淀法^[6]进行水样浓缩,参照张冬青等^[7]方法分别采用蔗糖密度梯度离心法和免疫荧光染色法进行“两虫”的分离和检测。镜检时分别在异硫氰酸荧光素(FITC)、二脒基苯基吡啶(DAPI)染色及微分干涉对比(DIC)模式下对贾第虫包囊和隐孢子虫卵囊进行确认并计数。

1.3 健康危害评价

本研究采用定量微生物风险评估法(quantitative microbial risk assessment),该方法框架包括危害识别、暴露评估、剂量-效应模型和风险描述等,已被广泛用于病毒和细菌的健康危害评价。

1.3.1 危害识别 “两虫”均经口感染后,引起宿主腹泻,严重者可能导致脱水甚至死亡。与细菌、病毒等其他水源性病原微生物不同,“两虫”对水处理常用的氯消毒有较强的抵抗力,常规浓度下几乎没有灭活效果,加上感染剂量低,摄入几个卵囊或包囊就可能被感染。本研究中A污水处理厂日处理量达63万m³,二级处理后的污水经氯消毒后直接排放到附近河道。该河为附近在建郊野公园湖泊补给水源和绿地灌溉水源。在公园中游玩有可能经湖泊游玩和绿地玩耍接触到水中

“两虫”,继而有感染风险。

1.3.2 暴露评估 根据水中“两虫”浓度和单次暴露活动中摄入水的体积,通过公式(1)计算暴露剂量。

$$N=C \cdot I \cdot 10^{-DR} \cdot V, \quad (1)$$

其中 N 指单次摄入贾第虫包囊或隐孢子虫卵囊的数量, C 指检测到污水中贾第虫包囊或隐孢子虫卵囊的浓度, I 指检测到的“两虫”具有感染性的比例, DR 指污水处理排放前处理时的消毒效率, V 指摄入水的体积。

对检测获得的“两虫”原始浓度数据进行统计学分析,采用概率分布函数进行数据拟合后再应用于公式(1)。污水中具有感染性的“两虫”比例(I)参考文献数据,分别取13%和25%^[8]。水处理过程中用氯消毒对贾第虫的消毒效率(DR)约0.5log,对隐孢子虫的 DR 为0^[9];若采用紫外线或臭氧等消毒方法,贾第虫 DR 一般可达3.0log^[8],隐孢子虫 DR 为2.42log^[10]。通过郊野公园游玩等户外活动接触浇灌的绿地和湖泊水,其摄入水的体积(V)按照公共绿地使用者单次暴露大约摄入量5mL^[8]。

1.3.3 剂量-效应模型 通过人体志愿者吞服实验,研究者获得了“两虫”剂量-致病效应数据,据此建立的数学模型主要有贝塔-泊松模型和指数模型。其中指数模型在“两虫”危害评价中应用最为广泛。该模型认为对于某一特定人群,吞食单个卵囊或包囊引起人体感染的概率为常量 r ,则单次发生感染的概率可用以下公式(2)表示。

$$P_i=1-e^{-rN}, \quad (2)$$

其中 P_i 为摄入剂量 N 的贾第虫包囊/隐孢子虫卵囊而被感染的可能性, r 为吞食单个卵囊或包囊发生感染的概率。对贾第虫,参数 r 为0.0199^[11];对隐孢子虫,参数 r 为0.00526^[12]。

1.3.4 风险描述 风险描述是在综合考虑“两虫”各自健康危害,计算暴露人群可能产生的某种健康危害效应的发生概率。参照美国环境保护署的规定,本研究以 1.0×10^{-4} 作为发生感染“两虫”可接受的最大概率值^[11]。通过单次感染概率(P_i)与一年中暴露次数(n)按公式(3)计算感染“两虫”的年概率(P_a)^[13]。本研究1年的暴露次数 n 按每周1次计,即按全年52次计。

$$P_a=1-(1-P_i)^n, \quad (3)$$

由于“两虫”的感染是独立发生,其感染综合年概率(P_{comb})公式(4)表示^[8]。

$$P_{\text{comb}}=1-(1-P_{\text{ag}})(1-P_{\text{ac}}), \quad (4)$$

其中 P_{ag} 和 P_{ac} 分别为贾第虫和隐孢子虫的年感染概率。

2 结果

2.1 “两虫”的浓度水平

9 份样品检测结果显示 A 污水处理厂出水贾第虫检测全部为阳性 (9/9), 浓度范围为 11~53 包囊/L, 平均 (26.89 ± 15.51) 包囊/L; 隐孢子虫阳性率 88.9% (8/9),

浓度范围为 0~20 卵囊/L, 平均 (7.22 ± 5.83) 卵囊/L (表 1)。

2.2 “两虫”感染危害

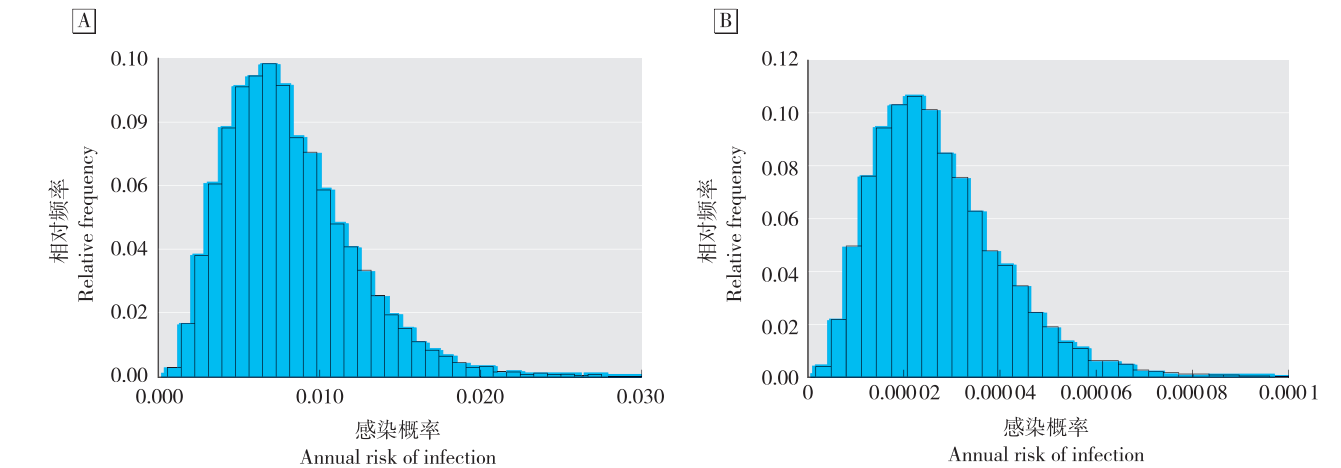
监测的 A 污水处理厂出水因灌溉绿地和湖泊玩耍而引起感染“两虫”的潜在健康危害见表 2。在现有常规氯消毒后排放时, 发生感染“两虫”的年概率分别为 5.69×10^{-3} 和 2.46×10^{-3} , “两虫”综合为 8.15×10^{-3} 。若污水排放前经紫外线或臭氧消毒处理, “两虫”感染年概率可降低为 2.75×10^{-5} (图 1)。

表 1 A 污水处理厂处理后出水中“两虫”的浓度 (n=9)

Table 1 Concentrations of <i>Giardia</i> and <i>Cryptosporidium</i> in treated effluent of A wastewater treatment plant						
病原体 (Pathogen)	阳性数 (Positive)	阳性率 (Positive rate, %)	均值 ($\bar{x} \pm s$, /L)	最小值 (Min)	最大值 (Max)	最佳拟合函数 Best distribution fitting
贾第虫 (<i>Giardia</i>)	9	100.0	26.89 ± 15.51	11	53	伽玛分布 (3.565 2, 7.542 1) Gamma (3.565 2, 7.542 1)
隐孢子虫 (<i>Cryptosporidium</i>)	8	88.9	7.22 ± 5.83	0	20	指数分布 (7.222 2) Expon (7.222 2)

表 2 不同消毒方式下经水感染“两虫”的概率

Table 2 Risks of <i>Giardia</i> and <i>Cryptosporidium</i> infection from effluent by different treatment processes										
污水消毒方式 Treatment process	单次感染 P_i Daily risk of infection				年感染 P_a Annual risk of infection				综合年感染 P_{comb} Combined annual risk of infection	
	贾第虫 <i>Giardia</i>		隐孢子虫 <i>Cryptosporidium</i>		贾第虫 <i>Giardia</i>		隐孢子虫 <i>Cryptosporidium</i>			
	概率(Risk)	95%CI	概率(Risk)	95%CI	概率(Risk)	95%CI	概率(Risk)	95%CI	概率(Risk)	95%CI
常规氯消毒 Chlorination	1.10×10^{-4}	$0.27 \times 10^{-4} \sim 2.50 \times 10^{-4}$	4.75×10^{-5}	$0.12 \times 10^{-5} \sim 17.51 \times 10^{-5}$	5.69×10^{-3}	$1.40 \times 10^{-3} \sim 12.91 \times 10^{-3}$	2.46×10^{-3}	$0.06 \times 10^{-3} \sim 9.07 \times 10^{-3}$	8.15×10^{-3}	$2.42 \times 10^{-3} \sim 17.38 \times 10^{-3}$
紫外线或臭氧消毒 UV/Ozonization	3.48×10^{-7}	$0.85 \times 10^{-7} \sim 7.91 \times 10^{-7}$	1.81×10^{-7}	$0.46 \times 10^{-7} \sim 6.66 \times 10^{-7}$	1.81×10^{-5}	$0.44 \times 10^{-5} \sim 4.11 \times 10^{-5}$	1.81×10^{-7}	$0.05 \times 10^{-7} \sim 6.66 \times 10^{-7}$	2.75×10^{-5}	$0.80 \times 10^{-5} \sim 6.00 \times 10^{-5}$



[注] A: 常规氯消毒; B: 紫外线或臭氧消毒。[Note] A: Chlorination; B: UV/Ozonization.

图 1 不同消毒方式处理出水中“两虫”年感染概率分布图

Figure 1 Risk distribution of *Giardia* and *Cryptosporidium* infection from effluent by different treatment processes

3 讨论

近年来, “两虫”经介水性暴发感染, 使环境水中“两虫”污染受到了国内外广泛关注。对于污水处理厂二级出水, Rose 等^[11]报道美国某污水处理厂二级处

理出水中“两虫”的浓度水平分别为 0.14~23 包囊/L 和 0.25~13 卵囊/L; Bukhari 等^[14]检测英国二级处理出水中的“两虫”浓度水平分别为 10~720 包囊/L 和 10~60 卵囊/L; 宗祖胜等^[15]报道国内某市二级处理出水

中“两虫”浓度分别为6~153包囊/L和1~46卵囊/L。本研究检测到的“两虫”浓度与上述国内外报道的浓度水平相当。

在风险评价过程中,检测获得的原始数据通常先需要进行统计学分析,采用概率分布函数进行数据拟合。对于环境病原微生物,常用的概率分布有泊松分布、负二项分布、指数分布、正态分布、对数正态分布、韦伯分布、伽玛分布、贝塔分布等。An等^[16]在评价饮用水风险时采用指数分布对原水中隐孢子虫监测数据进行拟合;Teunis等^[17]对某水库隐孢子虫的监测数据进行拟合,认为负二项分布对数据拟合最好。本研究对检测到的“两虫”浓度数据采用上述常用概率分布函数进行拟合,结果发现贾第虫检测数据采用伽玛分布最好,而隐孢子虫数据用指数分布最佳。

如前所述,健康危害评价是多步骤、复杂的过程,受到多种因素的影响,而污染物的浓度是最为关键的因素之一。严格来说,健康风险评价危害评价中污染物浓度水平应该是直接接触时的浓度水平,如通过监测污水处理后残留污染物浓度水平评价其造成二次污染健康风险时,就要考虑到排入的纳污河水稀释度、河水自净等因素。但是,由于这些又受到季节、降雨等复杂因素的影响,加之危害风险管理一般都以控制最高可能危害为目标,在不能准确获得上述因素的情况下,危害评价常采用忽略上述因素评价其最高可能发生的概率风险值。基于上述考虑,本研究中评价以排污河为补给水源的在建郊野公园中“两虫”潜在风险危害时,既没有考虑排污河中“两虫”本底值(直接采用排入的浓度),也没有考虑阳光等环境因素对“两虫”的杀灭效果。

美国环境保护署地表水处理法针对化学物风险规定其致癌年发生概率最高为 1×10^{-4} 。针对环境中生物性污染物的健康危害研究,也常采用该年发生概率作为最大可接受的风险参考值。Ryu等^[8]评价了再生水用于高尔夫球场、运动场等不同场所时其“两虫”的健康风险,结果发现评价的7个再生水厂水在单用氯消毒时,无论用于哪个场所,其“两虫”年感染概率均高于 1×10^{-4} ,最高可达 1.58×10^{-1} ;而在采用氯联合紫外线消毒时,年感染概率可降低至满足 1×10^{-4} 。赵欣等^[18]在研究再生水生物学标准制定过程中,对以污水厂二级出水用于城市绿化灌溉的感染概率进行了计算,其年感染概率也远高于 1×10^{-4} 这一可接

受值。本研究中,污水处理后经氯消毒排放至郊野公园补给河流中,经绿地和湖泊游玩接触到水中的“两虫”,无论是贾第虫还是隐孢子虫,其感染概率均超出了最大可接受值,存在一定的生物安全性隐患。若采用对“两虫”有灭活效果的紫外线或臭氧消毒,则感染贾第虫或隐孢子虫的年概率降低至 2.75×10^{-5} ,满足可接受的阈值。因此,针对污水中“两虫”等病原微生物风险时,在采用氯消毒工艺的同时有必要联合其他消毒方式,以保证水质安全。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献

- [1] Hijnen WA, Beerendonk EF, Medema GJ. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review[J]. Water Res, 2006, 40(1): 3-22.
- [2] Graczyk TK, Fayer R, Cranfield MR. Zoonotic transmission of *Cryptosporidium parvum*: Implications for water-borne cryptosporidiosis[J]. Parasitol Today, 1997, 13(9): 348-351.
- [3] Karanis P, Kourenti C, Smith H. Waterborne transmission of protozoan parasites: a worldwide review of outbreaks and lessons learnt[J]. J Water Health, 2007, 5(1): 1-38.
- [4] Hijnen WA, Dullemeier YJ, Schijven JF, et al. Removal and fate of *Cryptosporidium parvum*, *Clostridium perfringens* and small-sized centric diatoms (*Stephanodiscus hantzschii*) in slow sand filters[J]. Water Res, 2007, 41(10): 2151-2162.
- [5] Montemayor M, Costan A, Lucena F, et al. The combined performance of UV light and chlorine during reclaimed water disinfection[J]. Water Sci Technol, 2008, 57(6): 935-940.
- [6] Vesey G, Slade JS, Byrne M, et al. A new method for the concentration of *Cryptosporidium* oocysts from water[J]. J Appl Bacteriol, 1993, 75(1): 82-86.
- [7] 张冬青, 李红岩, 李栋, 等. 密度梯度分离纯化/免疫荧光技术检测饮用水中“两虫”[J]. 中国给水排水, 2009, 25(2): 78-81.
- [8] Ryu H, Alum A, Mena KD, et al. Assessment of the risk of infection by *Cryptosporidium* and *Giardia* in non-potable reclaimed water[J]. Water Sci Technol, 2007, 55(1/2): 283-290.
- [9] WHO. Risk assessment of *Cryptosporidium* in drinking water [M]. Geneva: World Health Organization, 2009: 43-44.
- [10] Cummins E, Kennedy R, Cormican M. Quantitative risk

- assessment of *Cryptosporidium* in tap water in Ireland[J]. Sci Total Environ, 2010, 408(4): 740-753.
- [11] Rose JB, Haas CN, Regli S. Risk assessment and control of waterborne Giardiasis[J]. Am J Public Health, 1991, 81(6): 709-713.
- [12] Pouillot R, Beaudeau P, Denis JB, et al. A quantitative risk assessment of waterborne cryptosporidiosis in France using second-order Monte Carlo simulation[J]. Risk Analysis, 2004, 24(1): 1-17.
- [13] Haas CN. Estimation of risk due to the doses of microorganisms: a comparison of alternative methodologies[J]. Am J Epidemiol, 1983, 118: 573-582.
- [14] Bukhari Z, Holt DM, Ware MW, et al. Blind trials evaluating *in vitro* infectivity of *Cryptosporidium* oocysts using cell culture immunofluorescence[J]. Can J Microbiol, 2007, 53(5): 656-663.
- [15] 宗祖胜, 胡洪营, 卢益新, 等. 某市贾第鞭毛虫和隐孢子虫污染现状[J]. 中国给水排水, 2005, 21(5): 44-46.
- [16] An W, Zhang D, Xiao S, et al. Quantitative health risk assessment of *Cryptosporidium* in rivers of Southern China based on continuous monitoring data[J]. Environ Sci Technol, 2011, 45(11): 4951-4958.
- [17] Teunis PFM, Medema GJ, Kruidenier L, et al. Assessment of the risk of infection by *Cryptosporidium* or *Giardia* in drinking water from a surface water source [J]. Water Research, 1997, 31(6): 1333-1346.
- [18] 赵欣, 胡洪营, 谢兴, 等. 基于健康风险评价的再生水生物学标准制定方法[J]. 给水排水, 2010, 36(5): 43-48.
- (收稿日期: 2014-08-30)
(英文编辑: 汪源; 编辑: 张晶; 校对: 丁瑾瑜)

【告知栏】

《环境与职业医学》杂志被中国科学引文数据库(CSCD)收录

2015年4月,中国科学院文献情报中心公布了2015—2016年度中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, CSCD)来源期刊。该库收录来源期刊1200种,其中中国出版的英文期刊194种,中文期刊1006种。经由定量遴选、专家定性评估,《环境与职业医学》杂志被收录为CSCD来源期刊(http://sciencechina.cn/cscd_source.jsp)。

CSCD创建于1989年,收录我国生物学、医药卫生、环境科学等领域出版的中英文科技核心期刊和优秀期刊千余种。2007年开始,CSCD与美国汤森路透集团合作,是美国科技信息研究所(ISI)Web of Science平台上第一个非英文语种的数据库,已实现与Web of Science的跨库检索。CSCD来源期刊与SCI在同一平台上面向全球提供服务,所有进入CSCD的期刊论文均可经由该平台检索,为国内唯一实现该功能的数据库。

《环境与职业医学》杂志(<http://jeom.scdc.sh.cn:8081>),原名《劳动医学》,创刊于1984年,由上海市卫生和计划生育委员会主管,上海市疾病预防控制中心、中华预防医学会主办,系中华预防医学系列杂志。国际连续出版物号:ISSN 2095-9982;CODEN HYZYAZ;国内统一连续出版物号:CN 31-1879/R。

《环境与职业医学》杂志衷心感谢各位编委、审稿专家、作者和读者对本刊工作的支持!衷心希望广大读者和作者一如既往支持本刊工作,踊跃投稿!