

# 潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究

张建<sup>1,2</sup>, 邵文生<sup>1</sup>, 何苗<sup>2\*</sup>, 胡洪营<sup>2</sup>, 高宝玉<sup>1</sup>

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘要:**考察了冬季潜流人工湿地污染河水处理系统在不同水力负荷下对污染物去除的效果。结果表明,水温 15℃左右时,水力负荷由 30cm/d 降低到 15cm/d 后,氨氮转化率由 14% 上升到 39%,COD 的平均去除率由 20% 上升到 31%,水温的降低对氨氮去除效果有很大的影响。在湿地表面覆盖塑料地膜能有效地提高系统对污染物的去除效果,覆盖地膜后,氨氮平均去除率由 29.4% 上升到 67.6%,COD 的平均去除率由 29.0% 提高到 46.6%,脲酶活性由 0.025 mg/(g·d) 上升到 0.037 mg/(g·d),脱氢酶的活性由 0.17 μL/(d·g) 上升到 4.54 μL/(d·g)。微生物活性研究表明,覆盖地膜后系统温度的升高能提高系统中微生物的活性。植物污染物释放试验表明,冬季地表植物腐烂会向水中释放大量的污染物质,影响系统的净化效果,因此秋季应对湿地植物及时进行收割。

**关键词:**人工湿地; 冬季运行; 污染河水

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2006)08-1560-05

## Treatment Performance and Enhancement of Subsurface Constructed Wetland Treating Polluted River Water in Winter

ZHANG Jian<sup>1,2</sup>, SHAO Wen-sheng<sup>1</sup>, HE Miao<sup>2</sup>, HU Hong-ying<sup>2</sup>, GAO Bao-yu<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Treatment performance of subsurface constructed wetland treating polluted river water in winter was studied. When hydraulic loading fell down from 30cm/d to 15cm/d, the average removal rates of ammonium nitrogen and COD rose up from 14% and 20% to 39% and 31% respectively. Water temperature had great influence on ammonium nitrogen removal. Membrane overlay on the wetland could improve pollutants removal efficiently. The average removal rates of ammonium nitrogen and COD could rise up from 29.4% and 29% to 67.6% and 46.6% respectively. Microorganism enzyme activity experiments show that increase of microorganism activity caused by membrane overlay contributed a lot to pollutants removal enhancement. Urease activity rose up from 0.025 mg/(g·d) to 0.037 mg/(g·d) with membrane overlay, and dehydrogenase activity rose up from 0.17 μL/(d·g) to 4.54 μL/(d·g) with membrane overlay. The pollutants releasing experiment of aquatic plants show that faded plants would release a lot of pollutants into water. Therefore, plants harvest was necessary in autumn.

**Key words:** constructed wetland; winter; polluted river water

近年来,随着经济的高速发展,生活污水和工业废水大量排放,面源污染不断加剧,导致许多河流被污染,开始威胁到城市 and 工业供水安全及人民健康<sup>[1]</sup>,因此,污染河水的处理已经成为一个为世人关注的焦点。

人工湿地具有缓冲容量大、管理简便、基建及运行费用低廉等特点,因此该技术成为污染河水处理的优选技术。目前,在国外人工湿地工艺已经开始被应用于流域规模的污染河水处理<sup>[2]</sup>。

作为一种露天的生态工程水处理技术,人工湿地受环境、特别是季节温度的影响较大,研究表明,在冬季,氨氮的转化率会由春夏季的 78% 以上降到 16%,磷酸盐的去除率会由 50% 以上降低到

13%<sup>[3]</sup>。而在我国北方,冬季降水相对较少,由此导致河水中污染物浓度较其它季节相对较高,因此,在冬季如果不对人工湿地工艺采取一定的强化措施,系统的处理出水水质将较夏季出水恶化很多。

本研究选择我国典型北方城市淄博作为试验所在地,考查了潜流人工湿地污染河水处理系统在冬季的运行效果,并采用地膜覆盖的措施对污染物去除效果进行强化,同时对冬季湿地中生物系统的功

收稿日期:2005-07-05;修订日期:2005-10-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601080);国家自然科学基金项目(50508019)

作者简介:张建(1976~),男,博士,讲师,主要研究方向为水污染控制, E-mail: zhangjian00@sdu.edu.cn

\* 通讯联系人

能特性进行了分析.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

人工湿地污染河水处理中试系统建设在淄博孝妇河黄土崖段的一段河滩上,以孝妇河水作为人工湿地中试系统的进水.孝妇河是流经淄博市的一条典型城市纳污河道,污染源主要为矿山污水,河水污染严重,水质为劣类.

本研究采用3套规格相同的潜流人工湿地污染河水处理中试系统,湿地填料层的长、宽、高分别为15m、1.5m、0.5m.以等体积掺混废砖和废陶获得的混合物为填料,填料粒径2~4cm,湿地表层沿水流方向依次等长度种植芦苇、菖蒲和美人蕉.冬季运行时间为2004-10~2004-12.

其中,1号系统在冬季对植物进行了收割,但地表没有覆盖地膜;2号系统的植物在秋季进行了收割,并在试验后期在系统表面覆盖了地膜,3号系统对植物没有进行收割也没有覆盖地膜.

### 1.2 河水水质

孝妇河的水质情况如表1所示.河水的可生化性较差, $BOD_5/COD < 0.3$ .由于河水中磷的浓度很低,所以本研究没有将磷作为去除对象进行考察.

表1 污染河水的水质情况/ $mg\ L^{-1}$

Table 1 Pollutants concentration in polluted

Xiaofu river water/ $mg\ L^{-1}$

| COD   | 氨氮   | 总氮   | 总磷   |
|-------|------|------|------|
| 40~70 | 1~20 | 7~25 | <0.1 |

### 1.3 试验方法

孝妇河潜流人工湿地污染河水处理系统于

2004-04建成通水.进入10月份,淄博市的气温开始大幅下降,地表植物逐渐枯死.

在冬季气温下降的情况下,采用覆盖地膜的方法来提高污染物的去除效果,并对冬季人工湿地中生物系统的功能特性进行了研究.其中10-20~11-08的水力负荷是30 cm/d,11-09~11-30的水力负荷是15 cm/d,11-30以后的水力负荷是10 cm/d.

本研究主要对污染河水中氨氮和COD的去除规律进行了考察,污水中氨氮和COD的测量方法分别为纳氏试剂比色法和重铬酸钾滴定法.对冬季潜流人工湿地内微生物生物系统的功能特性进行了研究,主要考察了系统内土壤脲酶和脱氢酶活性的变化规律,其测量方法按文献[4,5]进行.此外,进行了植物浸泡试验,研究了在冬季湿地枯萎植物腐烂时的污染物释放规律,即在冬季气温条件下(约4℃),将1.0g干枯的植物置于50mL蒸馏水中进行浸泡,对浸泡液中污染物浓度的历时变化进行分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 冬季运行条件下的污染物去除效果

在5~15℃的水温条件下,考察了1号人工湿地在水力负荷为30 cm/d、15 cm/d和10 cm/d的情况下的污染物去除效果.

1号湿地氨氮进出水浓度变化如图1所示.可见,当水温降到15℃左右时,在30 cm/d的水力负荷条件下,湿地对氨氮的去除效果一直维持在一个较低的水平,其平均转化率仅有14%,并且出水氨氮浓度始终在5 mg/L以上.当水力负荷调整到15 cm/d后,氨氮的去除效果得到一定的提高,整体平均去除率可达39%,是水力负荷下调前的约2.8倍.但是,当水温下降到7℃以下后,人工湿地对氨氮的去除效果继

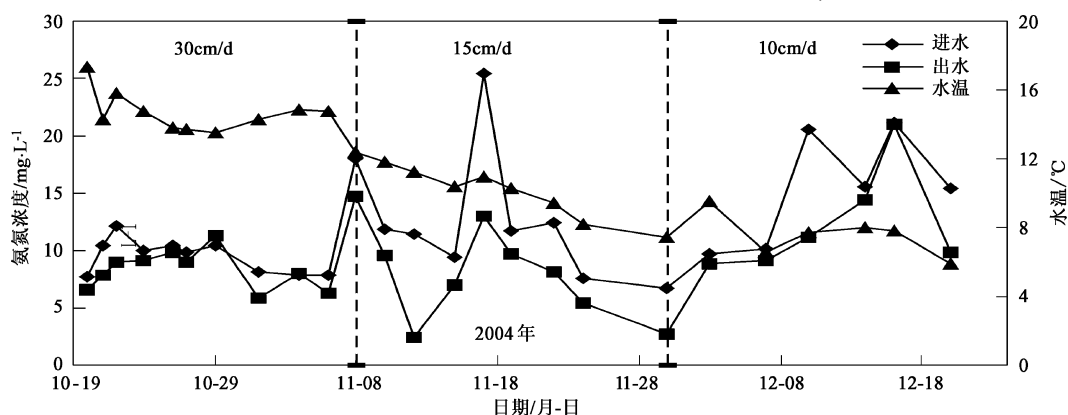


图1 1号湿地冬季氨氮进出水浓度变化

Fig. 1 Ammonium nitrogen removal in No. 1 system

续下降,虽然将水力负荷继续下调至 10 cm/d,但是氨氮的平均转化率依然只有约 18 %.

1 号湿地 COD 的进出水浓度变化图 2 所示. 由图 2 可以看出,虽然水温不断下降,但是在降低水力负荷之后,系统对 COD 的去除效果也随之上升,水

力负荷从 30 cm/d 降到 15 cm/d 后,对 COD 的平均去除率由 20 % 升高到 31 %,且在同一水力负荷条件下,污染物去除效果并没有发生较大的波动,可见,温度对 COD 去除效果的干扰相对较小.

## 2.2 冬季运行效果的强化

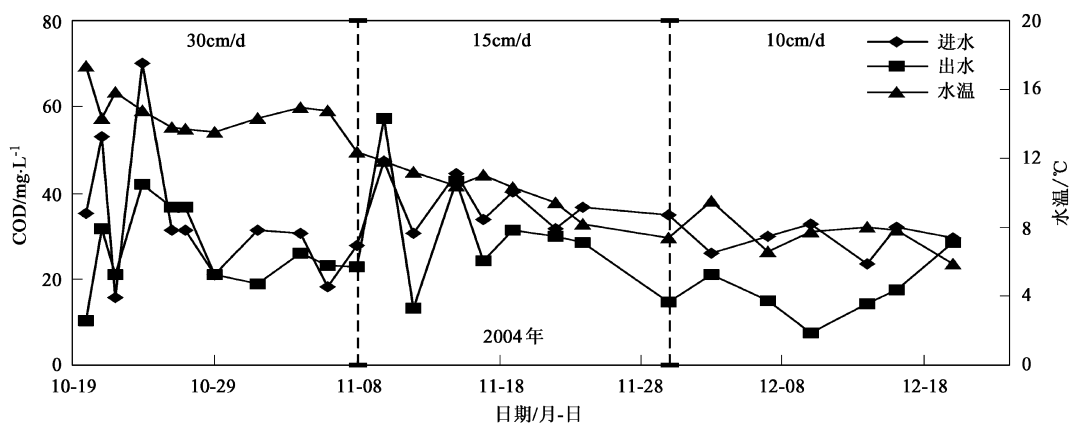


图 2 1 号湿地冬季 COD 进出水浓度变化

Fig. 2 COD removal in No. 1 system

由上述冬季运行效果结果可以看到,水温是制约污染物特别是氨氮去除的一个重要因素. 为了提高系统温度,尝试采用地膜覆盖技术,即在降低水力负荷至 10 cm/d 的前提下,在 2 号湿地地表覆盖一层普通塑料地膜,与未覆盖地膜的 1 号湿地进行对比试验. 试验从 11-08 开始,到 12-20 结束(试验结束的原因是气温降至 -5 以下,系统进水处大面积结冰,导致无法进水).

覆盖地膜后,湿地系统中的水温比无地膜覆盖参照系统高出 2~6 ,1 号、2 号湿地对氨氮的去除效果如图 3 所示. 由图 3 可以看出,覆盖了地膜的 2 号湿地对氨氮的去除效果明显好于未覆盖地膜的 1 号湿地,平均转化率可达到 67.6 %,是 1 号湿地氨氮平均转化率的 2 倍以上.

1 号、2 号湿地对 COD 的去除效果如图 4 所示,

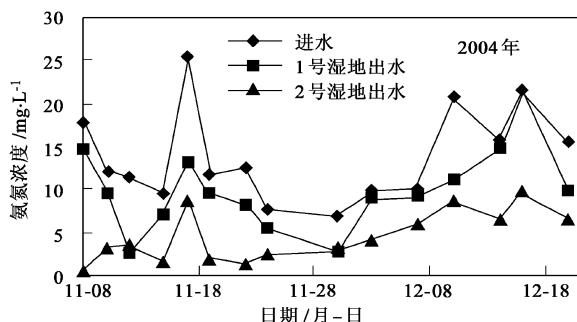


图 3 1 号和 2 号湿地氨氮去除效果比较

Fig. 3 Ammonium nitrogen removal in No. 1 and No. 2 system

可以看出,地膜覆盖对 COD 去除的影响效果没有对氨氮的大,但仍可以取得较好的效果,COD 平均去除率由 29.0 % 提高到 46.6 %.

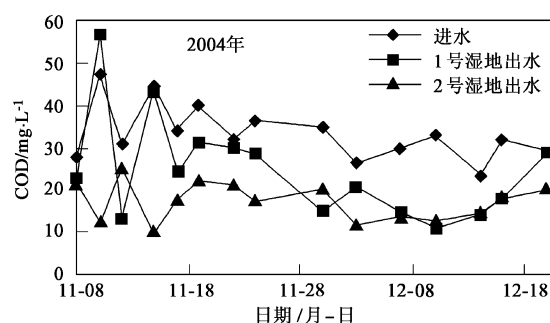


图 4 1 号和 2 号湿地 COD 去除效果比较

Fig. 4 COD removal in No. 1 and No. 2 system

地膜覆盖技术所采用的膜为农民构筑普通大棚所用的塑料薄膜,零售价格约为 12 元/kg,价格低廉,且操作简便,利于广泛推广.

## 2.3 冬季条件下生物系统的功能特性分析

### 2.3.1 微生物活性分析

脱氢酶和脲酶的活性常被用来作为土壤中微生物活性的评价指标. 脱氢酶能促进有机物质的脱氢作用,它起着氢的中间传递体的作用. 土壤脱氢酶活性的测定,主要是根据 Lenhard 所拟定的方法进行. 脲酶能酶促尿素的水解生成氨和二氧化碳. 脲酶在土壤中一般在 pH 6.5~7.0 的范围内活性最大. 土

壤中脲酶活性通常采用 1g 土样在 37℃ 培养 24h 释放出氨氮的 mg 数来表示<sup>[4~7]</sup>. 对冬季运行条件下人工湿地系统中的土壤微生物活性进行了分析, 结果如表 2 所示.

表 2 人工湿地系统中微生物活性比较

| Table 2 Comparison of microorganism enzyme activity in wetland |                                                            |                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 湿地编号                                                           | 脲酶活性<br>/ $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ | 脱氢酶活性 ( $\text{H}^+$ )<br>/ $\mu\text{L} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$ | 平均水温/<br>℃ |
| 1 号(覆盖地膜)                                                      | 0.037                                                      | 4.54                                                                           | 8          |
| 2 号(未覆盖地膜)                                                     | 0.025                                                      | 0.17                                                                           | 3(表层结冰)    |

由表 2 可以看出, 覆盖了地膜后微生物的活性有了较大的提高, 脲酶的活性提高到覆盖地膜前的 1.5 倍, 脱氢酶的活性提高了近 27 倍. 由此可见, 覆盖地膜后, 由于系统温度的上升, 微生物活性得到显著提高, 这是覆盖地膜后系统对污染物去除效果提高的一个重要原因.

2.3.2 植物功能特性分析

为了考察秋冬季植物腐烂是否会向水中释放污染物质从而影响系统的净化效果, 本研究做了植物浸泡试验, 得到的植物氨氮和有机质浸泡液浓度的变化曲线如图 5 和图 6 所示.

由图 5 可以看出, 同等质量的植物中芦苇析出的氨氮量远高于其他 2 种植物, 而且其氨氮析出的时间较长. 由图 5 还可以看出, 浸泡一段时间后各种植物的浸泡液中氨氮的浓度都维持在一个比较稳定的浓度.

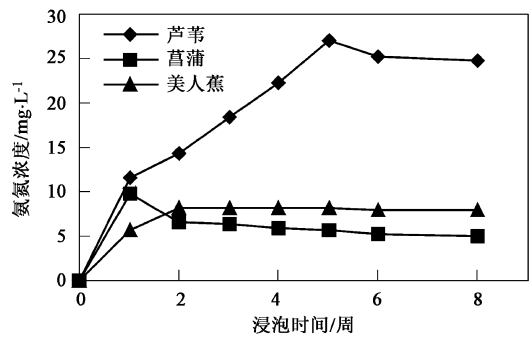


图 5 湿地植物氨氮释放情况

Fig. 5 Ammonium nitrogen releasing analysis of aquatic plants

从图 6 可以看出美人蕉中 COD 析出较慢, 而且和氨氮不同, 浸泡液中的 COD 浓度达到峰值后都会随着时间而大幅度降低, 这可能是由于析出溶解性有机质的挥发或生物降解造成的.

对进行植物收割的 1 号湿地和未进行收割的 3 号湿地的污染物去除效果进行了分析, 结果如表 3 所示. 可见, 11 月底之前进行植物收割的 1 号湿地

和未进行植物收割的 3 号湿地对氨氮和 COD 的去除效果差异较大, 但是进入 12 月份之后, 2 个湿地出水污染物浓度之间的差异明显减小, 这是由于气温下降, 枯萎植物降解速率下降, 且系统地表结冰, 析出的污染物难以渗入到下部水层造成的. 而且在潜流湿地中由于植物不是直接浸泡在水中, 所以腐烂植物的污染物释放情况应该与浸泡试验有所差异, 但是可以根据浸泡结果预测, 第 2 年春季由于腐烂植物中污染物的慢慢析出可能会导致未进行植物收割的系统对污染物去除效果的变差.

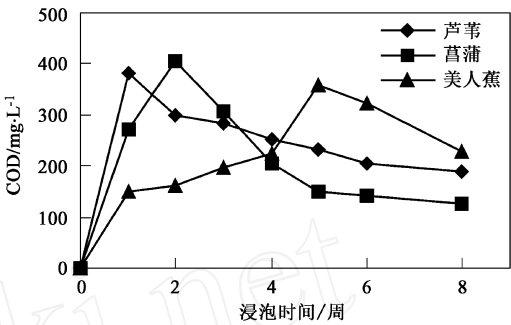


图 6 湿地植物 COD 释放分析

Fig. 6 COD releasing analysis of aquatic plants

表 3 1 号和 3 号湿地对氨氮和 COD 的去除效果

| Table 3 Ammonium nitrogen and COD removal in<br>No. 1 and No. 3 system |            |     |              |     |
|------------------------------------------------------------------------|------------|-----|--------------|-----|
| 日期/月-日                                                                 | 氨氮平均转化率/ % |     | COD 平均去除率/ % |     |
|                                                                        | 1 号        | 3 号 | 1 号          | 3 号 |
| 11-01 ~ 11-30                                                          | 31         | 15  | 27           | 19  |
| 12-01 ~ 12-20                                                          | 18         | 12  | 39           | 39  |

3 结论

(1) 在温度为 15℃ 左右时, 水力负荷从 30  $\text{cm}^3/\text{d}$  降到 15  $\text{cm}^3/\text{d}$  后, 氨氮和 COD 的去除效果分别由 14 %和 20 %提高到 39 %和 31 %. 在低温运行条件下, 水温对氨氮去除效果的影响大于对 COD 去除效果的影响.

(2) 冬季运行条件下(水温 5~10℃), 覆盖地膜能有效提高系统对污染物的去除效果, 氨氮平均转化率和 COD 平均去除率分别由未覆盖地膜的 29.4 %和 29.0 %上升到 67.6 %和 46.6 %.

(3) 微生物活性分析表明, 覆盖地膜后, 由于系统温度上升(比无地膜覆盖高出 2~6℃), 微生物活性得到提高, 脲酶活性提高到原来的约 1.5 倍, 脱氢酶活性提高到原来的约 27 倍.

(4) 地表植物腐烂会向水中释放大量的 COD

和氨氮,影响系统净化效果,因此秋季应当对湿地植物及时进行收割。

#### 参考文献:

- [1] 国家环保总局. 2003 年中国环境状况公报[R], 2003.
- [2] Woltemade C J. Ability of restored wetlands to reduce nitrogen and phosphorus concentrations in agricultural drainage water [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 53(3): 303 ~ 309.
- [3] Jing S R, Lin Y F, Lee D Y, *et al.* Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76: 131 ~ 135.
- [4] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [5] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [6] 梁威, 吴振斌, 等. 构建湿地机制微生物与净化效果及相关分析[J], *中国环境科学*, 2002, 22(3): 282 ~ 285.
- [7] 吴振斌, 周巧红, 等. 构建湿地中试系统基质剖面微生物活性的研究[J], *中国环境科学*, 2003, 23(4): 422 ~ 426.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8000 字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2) ..... 表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页 ~ 止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页 ~ 止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页 ~ 止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地. 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问. 对未刊稿件一般不退, 请作者自留底稿.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn