

用美人蕉、香根草、荆三棱植物带处理受污染河水

李睿华, 管运涛, 何苗, 胡洪营, 蒋展鹏

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 为了解美人蕉、香根草和荆三棱 3 种水生植物带改善河水水质的作用, 在中试规模上研究了它们处理受污染河水的效果。结果表明, 有植物带对污染物降解的效果好于无植物带, 其中荆三棱带效果最好, 它在整个运行期间对 COD、氨氮 NH_4^+-N 和总磷 TP 的去除效果分别为 44.1%、78.7% 和 71.4%。对出水溶解氧与水温进行了考察, 3 种植物带中, 荆三棱带的水温和溶解氧最低。各种植物带对河水中污染物的去除和改善水环境条件等方面有不同的特点, 在河岸带修复时应尽可能保证水生植物的多样性。

关键词: 河流生态修复; 水生植物带; 水质改善

中图分类号: X 703.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2006)03-0366-05

Treating polluted river water with *Canna glauca* l., *Vetiveria zizanioides* and *Scirpus yagara ohw* zones

LI Ruihua, GUAN Yuntao, HE Miao, HU Hongyin,
JANG Zhanpeng

(Department of Environmental Science and Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Polluted river water was treated with *Canna glauca* l., *Vetiveria zizanioides*, and *Scirpus yagara ohw* to investigate their impact on river water quality in pilot-scale tests. The results show that treatment with aquatic plants gives better water quality than in areas without aquatic plants with *Scirpus yagara ohw* giving the best results. On average, the *Scirpus yagara ohw* removes 44.1% of the COD, 78.7% of the ammonia, and 71.4% of the total phosphorous. Measurements of the dissolved oxygen and temperature of the effluent from the three treatment zones show that the temperature and dissolved oxygen are the lowest in the *Scirpus yagara ohw* zone. Three different aquatic plants have different abilities to remove water pollutants and improve water quality; therefore, biological diversity is a key component of river ecology restoration.

Key words: river ecology restoration; aquatic plants; water quality improvement

态系统的完整性起着重要作用。然而由于人类的不合理干扰使得这些河岸植物带受到破坏甚至消失。

在河道浅水处种植水生植物, 恢复河岸植物带是一种重要的恢复河流健康生态系统的措施^[1-3]。河岸水生植物带可以去除河水中的营养物质^[4-6], 减轻河流的非点源污染^[7-10], 对改善河水水质, 提高河流自净能力有重要作用。不同水生植物生长特性不同, 由其构成的河岸水生植物带对河水水质的改善特点各不相同。因此有必要对植物改善河水的特性进行深入研究。

美人蕉 (*Canna glauca* l.)^[11]、香根草 (*Vetiveria zizanioides*)^[12] 和荆三棱 (*Scirpus yagara ohw*)^[13] 在人工湿地处理废水中多有研究, 显示了较好的效果。本文模拟河道水生植物带设计了无植物带(空白)、美人蕉、香根草、荆三棱带等中试试验床, 并利用它们处理受污染河水。旨在通过中试了解河道各种水生植物带对污染河水的处理情况, 为受污染河流的水质净化和生态修复提供技术基础。

1 试验装置与方法

1.1 河水水质

试验使用的河水直接取自山东省淄博市孝妇河, 河水水质一年之中变化较大, COD 的浓度 ρ_{COD} 在 35~100 mg/L 之间, 氨氮 NH_4^+-N 浓度 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 为 5~30 mg/L, 总磷 TP 浓度 ρ_{TP} 在 0.05~0.4 mg/L 之间, 河水的可生化性较差, 可生化系数一般只有 0.1~0.2。

1.2 中试装置

中试场地位于山东淄博孝妇河河滩地上, 香根

收稿日期: 2005-02-25

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关项目 (2003AA 601080)

作者简介: 李睿华(1967-), 男(汉), 湖北, 博士后。

E-mail: liruihua@mail.tsinghua.edu.cn

通讯联系人: 管运涛, 副教授, E-mail: guangyt@tsinghua.edu.cn

在自然河流的河岸边一般都生长有水生植物, 它们对稳定河岸结构, 提供生物栖息地, 维持河流生

草、荆三棱在孝妇河河岸可以找到,美人蕉为当地花卉品种。各植物床长为15m,植物床宽为10m,空白床宽为5m。河水通过潜水泵直接打入进水槽,通过渗流坝使水均匀进入试验床,出水通过渗流坝进入出水槽。进水渗流坝高50cm,由5~10cm的碎石堆成,出水渗流坝建于30cm的夯土坝上,高20cm,由5~10cm的碎石堆成。试验床从进水到出水水深从0逐渐变为30cm,以考察不同深度的植物床情况。

植物种植时行距和列距都是25cm,菱形种植,植物2400棵左右。

通过阀门调节进水流量,水力停留时间(HRT)为2d时,水力负荷为8cm/d。在进水槽和出水槽取水样进行水质分析。

1.3 分析方法

主要分析项目有COD、 NH_4^+-N 和TP和浊度等,分析频次为每周2次。 ρ_{COD} 分析采用重铬酸钾法; $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 分析采用纳氏试剂分光光度法; ρ_{TP} 采用钼锑抗分光光度法;浊度采用浊度计测量。

2 试验结果

2.1 各中试床COD的去除效果

0号床为无植物的空白床。1、2、3号中试场地于2004年4月底分别移植美人蕉、香根草、荆三棱,随后立即通入孝妇河水。在5月底时抽查各植物的存活率发现,香根草和荆三棱在深水水域生长不及浅水水域,但总体成活率很高大于90%。美人蕉在水生小于20cm水域生长良好,基本都成活,在大于20cm水域成活率只有50%左右。

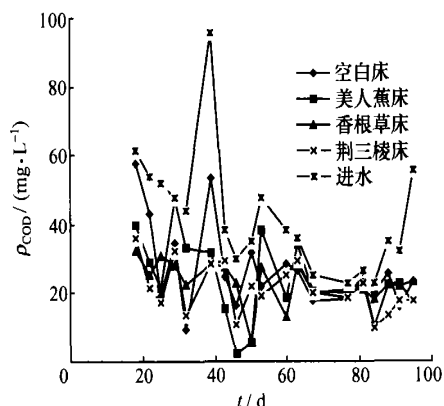
运行时间从6月10日开始到9月13日为止共95d。从6月25日开始调节进水量,1、2、3号床进水量为 $12\text{m}^3/\text{d}$,0号床进水量为 $6\text{m}^3/\text{d}$,各试验床中理论水力停留时间均为2d;运行60d后,调节水量使各试验床的运行时间为1d。一周取样2次。

图1是各中试床对COD的处理效果,其中 t 为运行时间。进水 ρ_{COD} 除偶尔接近 100mg/L 外基本在 $30\sim 60\text{mg/L}$ 之间。7月底孝妇河进入雨季,进水 ρ_{COD} 相对较低,在 $30\sim 40\text{mg/L}$ 之间。出水 ρ_{COD} 波动较大,不过大多数在 30mg/L 以下。

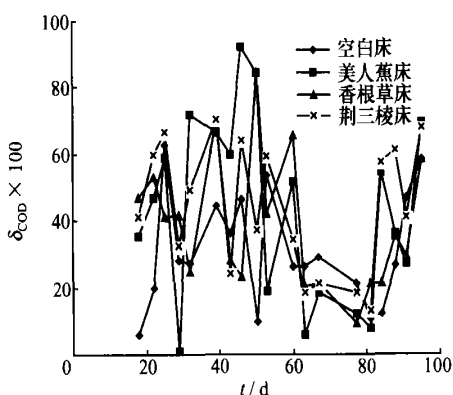
各试验床在整个运行期间的平均COD去除率 δ_{COD} 分别为31.1%、43.1%、38.8%、44.1%,这表明植物试验床对COD的去除效果比空白试验床要好,其中荆三棱床的效果最好。

在HRT为2d时0、1、2、3各试验床 δ_{COD} 分别为32.7%、53.4%、47.3%、49.0%,HRT为1d

时各试验床的 δ_{COD} 则为28.5%、31.4%、31.3%、37.0%。对于各植物床而言,HRT为2d时的平均去除效果大约比HRT为1d时高10个百分点以上;对于空白床,HRT为2d时的去除效果比1d时的大约高4个百分点。表明水力停留时间的延长对植物床去除水中COD更有利。



(a) 各中试床的进出水 ρ_{COD}



(b) 各中试床的 δ_{COD}

图1 各中试床对COD的处理效果
(运行时间60d之前HRT为2d,60d之后HRT为1d)

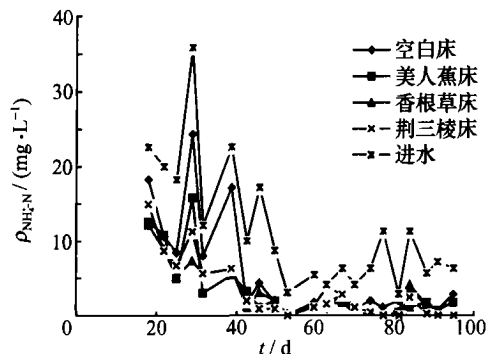
2.2 各中试床对 NH_4^+-N 的处理效果

图2是各中试床对河水中 NH_4^+-N 的处理效果。整个运行期间,河水 NH_4^+-N 浓度 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 在 $5\sim 35\text{mg/L}$ 之间变化。在7月底之前,河水 NH_4^+-N 浓度较高,在 $10\sim 35\text{mg/L}$ 之间。7月底孝妇河流域进入雨季。直到9月中旬,河水流量较大,河水 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 相对较低,一般在 10mg/L 以下。在雨季之前植物床出水 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 基本在 10mg/L 以下,空白床在 15mg/L 左右;在雨季开始后各中试床出水 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 基本在 2mg/L 以下。

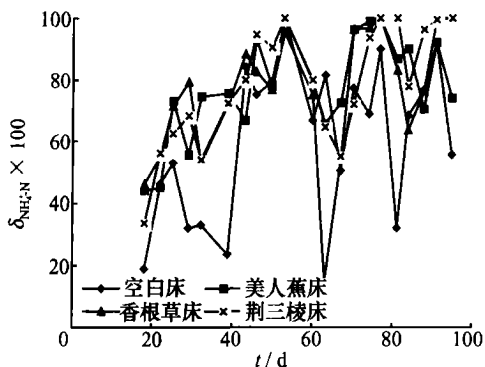
在整个运行期间,0、1、2、3号中试床对 NH_4^+-N 的去除率 $\delta_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 分别为62.2%、77.8%、75.3%、78.7%,3个植物床对 NH_4^+-N 的去除率都达到75%

以上,相对而言,荆三棱床效果最好。

在HRT为2d时Q₁、2、3各试验床 $\delta_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 分别为54.6%、70.6%、72.2%、71.2%,HRT为1d时各试验床的 $\delta_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 则为69.3%、84.8%、78.5%、85.9%。水力停留时间的缩短使 NH_4^+-N 的去除率反而提高很多,这一现象很反常。



(a) 各中试床进出水 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$



(b) 各中试床的 $\delta_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$

图2 各中试床对 NH_4^+-N 的处理效果

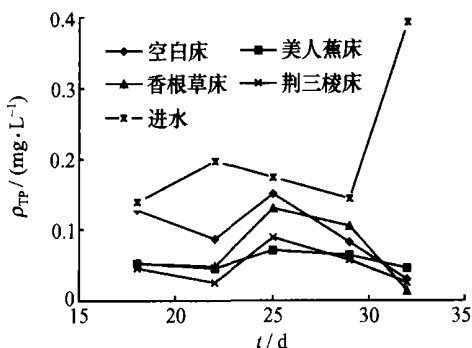
(运行时间60d之前HRT为2d, 60d之后HRT为1d)

2.3 各中试床对TP的处理效果

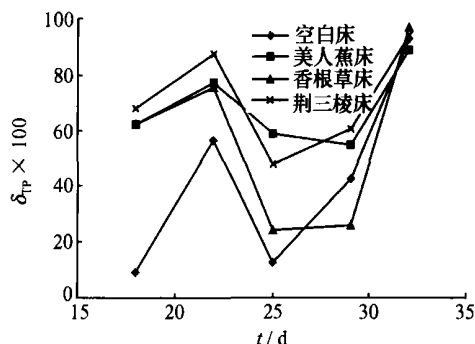
图3是各中试床对TP的处理效果。空白床、美人蕉、香根草床和荆三棱床对TP的平均去除率 δ_{TP} 分别为42.7%、68.1%、56.8%和71.4%。有植物的中试试验床对TP的处理效果好于空白床,荆三棱床对TP的处理效果最好。除偶尔TP浓度 ρ_{TP} 接近0.4mg/L外,进水TP浓度大多数情况下在0.2mg/L以下,达到地表水三类水体总磷标准,因此在开始阶段监测一段时间后决定不再连续监测。

2.4 各试验床出水的溶解氧

为了了解植物对出水溶解氧 ρ_{DO} 的影响,在2004年7月份和9月份对出水溶解氧进行了监测。监测点在各中试床靠近出水渗流坝中部的水底。图4是各试验床出水溶解氧情况(图中0709表示监测日期为2004年7月9日,以下同)。植物床中,美人



(a) 各中试床进出水的 ρ_{TP}



(b) 各中试床的 δ_{TP}

图3 各中试床对TP的处理效果

蕉床和香根草床出水溶解氧较高,荆三棱床最低。空白床在7月27日以后监测的 ρ_{DO} 较高,在6mg/L以上;7月27日之前的出水 ρ_{DO} 在1~2mg/L左右,和进水相差不大。

中试床出水溶解氧的大小与床内耗氧与复氧能力有关。耗氧主要表现为水体中微生物降解水中污染物而消耗氧气;复氧则有植物根部向水输送氧气、空气向水面输送氧气等。由于植物床植物生长茂密,风等气象因素对空气向水中输氧的影响较小,主要受植物根部输氧的影响。空白床里植物很少,复氧主要受风等气象因素的影响。因此可以初步判断植物根部向水输氧能力大小:美人蕉和香根草相近,但是都大于荆三棱。植物床出水溶解氧的波动远小于空白床,表明植物的存在起到稳定水体溶解氧的作用。

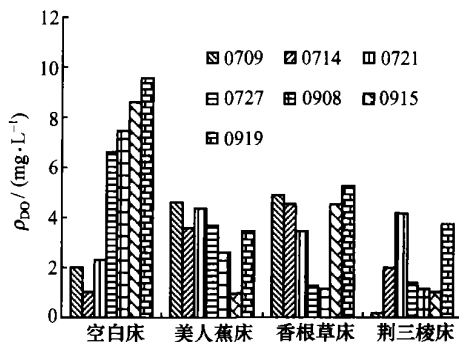


图4 各中试床出水的溶解氧(2004年数据)

2.5 各中试床的出水水温

为了了解植物对出水水温 θ 的影响, 在监测出水溶解氧的同时也对出水水温进行了监测。图 5 是各中试床出水水温情况。各中试床出水 θ 分别为 31.5、27.5、26.8 和 25.2。空白床出水水温高于各植物床。荆三棱床出水水温最低。其原因在于荆三棱生长茂密、旺盛, 植物密度高。空白床出水 θ 比荆三棱床高 6 以上, 表明茂密的植物可以为水体起到很强的遮蔽作用。

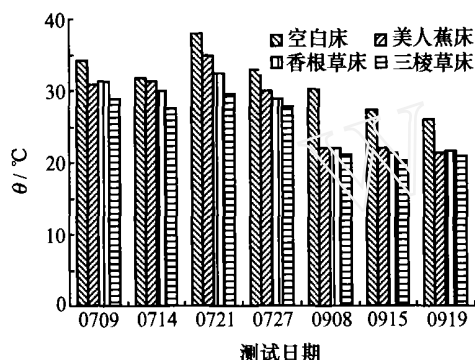


图 5 各中试床的出水水温 (2004 年数据)

3 讨论

对空白、美人蕉、香根草和荆三棱 4 个中试床进行了处理受污染河水的中试研究。整个监测时间为 95 d, 在第一阶段水力停留时间为 2 d, 即进水量 $12\text{m}^3/\text{d}$ (水流负荷 $8\text{cm}/\text{d}$), 第 2 阶段水力停留时间 1 d。整个运行时间内 4 个中试床 δ_{COD} 分别为 31.1%、43.1%、38.8%、44.1%; $\delta_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 分别为 62.2%、77.8%、75.3%、78.7%; 对 δ_{TP} 的平均去除率分别为 42.7%、68.1%、56.8% 和 71.4%。总体来看植物床的处理效果比空白床好, 其中荆三棱床的处理效果最好。

河道植物带处理降解水中污染物主要通过植物在水中的根和杆及水中的残败枝叶上吸附的微生物降解及植物的吸收等作用, 土壤和水中的微生物也有一定的作用。植物密度、根的生长状况、植物根部的泌氧能力等对植物带处理河水效果有重要影响, 决定了各植物带改善河水水质的特性。本试验中空白床对改善河水水质也有相当效果, 与空白床中并不完全“空白”, 其中有少量的植物及土壤和水中的微生物作用有关。

水力停留时间的缩短使 NH_4^+-N 的去除率反而提高很多, 这一反常现象的原因是雨季河水 NH_4^+-N 很低, 在植物吸收及微生物降解作用下 NH_4^+-N 降

解比较完全, 因而去除率高。在雨季前 NH_4^+-N 浓度很高, 超过中试床降解能力, 因而去除率低。这也说明植物带水域改善水质有其限度。

不同试验床出水溶解氧和水温较大差异。美人蕉和香根草植物带出水溶解氧较高, 荆三棱出水溶解氧较低。在夏季植物带出水比空白床出水水温低。荆三棱床平均出水 θ 比空白床低 6 以上, 比其他植物床也低 4 以上, 显示了其独特的遮蔽作用。河道植物带茂密的水生植物可以降低水温, 改善局部微型气候。

对于 3 种植物中试床而言, 荆三棱床改善河水水质效果最好, 这与荆三棱根系发达, 植物生长茂密, 既能提供较大的微生物附着面积, 又有较强的泌氧能力强有关。但是其他植物也有较好的效果, 在河道植物带修复时应该综合考虑, 不能因荆三棱的效果稍好就屏弃其他植物, 应根据具体情况将它们有机结合起来, 发挥综合效果。

4 结论

无植物、美人蕉、香根草和荆三棱植物带处理受污染河水的研究显示荆三棱带降解污染物的能力最强, 其根部向水中输氧能力最强, 能对水域通过更多的遮蔽, 降低水温。

植物带水域对污染物的去除能力大于无植物带水域。同时, 植物带水域中水的溶解氧一般情况下比无植物带稳定, 且在夏季水温低于无植物带水域的水温。说明在河道修复中植物对提高河流自净能力, 改善流域局部小气候有重要作用。

参考文献 (References)

- [1] 封福记, 杨海军, 于智勇. 受损河岸生态系统近自然修复实验的初步研究 [J]. 东北师大学报 (自然科学版), 2003, 36(1): 101~106
FENG Fuji, YANG Haijun, YU Zhiyong. Primal research on near natural restoration experiments of the damaged riparian ecosystem [J]. J. Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2003, 36(1): 101~106 (in Chinese)
- [2] 郑天柱, 周建仁, 王超. 污染河道的生态修复机理研究 [J]. 环境科学, 2002, 23: 115~117.
ZHENG Tianzhu, ZHOU Jianren, WANG Chao. Study on polluted riverway ecosystem rehabilitation mechanism [J]. Environmental Science, 2002, 23: 115~117. (in Chinese)
- [3] 王薇, 李传奇. 河流廊道与生态修复 [J]. 水利水电技术, 2003, 34(9): 56~58
WANG Wei, LI Chuanqi. Stream corridor and ecological rehabilitation [J]. Water Conservancy and Water Electricity Technology, 2003, 34(9): 56~58 (in Chinese)

- [4] 王超, 王沛芳, 唐劲松, 等 河道沿岸芦苇带对氮的削减特性研究 [J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 311 ~ 317.
WANG Chao, WANG Peifang, TANG Jingsong, et al Ammonia soption and retention characters in the riparian reed zone [J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(3): 311 ~ 317. (in Chinese)
- [5] JIANG Shuhren, LI N Yinfeng, LEE Deryuan, et al Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76: 131 ~ 135
- [6] 张军, 周琪, 何蓉 表面流人工湿地中氮、磷的去除机理 [J]. 生态环境, 2004, 13(1): 98 ~ 101.
ZHANG Jun, ZHOU Qi, HE Rong Mechanism of nitrogen and phosphorus removal in free-water surface constructed wetland [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1): 98 ~ 101. (in Chinese)
- [7] 董哲仁, 刘, 曾向辉 受污染水体的生物生态修复技术 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(3): 1 ~ 4.
DONG Zheren, LI Qian, ZENG Xianhui Biological and ecological rehabilitation technology [J]. *Water Conservancy and Water Electricity Technology*, 2002, 33(3): 1 ~ 4. (in Chinese)
- [8] 刘礼祥, 刘真, 章北平, 等 人工湿地在非点源污染控制中的应用 [J]. 华中科技大学学报(城市科学版). 2004, 21(1): 40 ~ 43.
LIU Lixiang, LIU Zhen, ZHANG Beiping, et al Constructed wetland applied in non-point source pollution control [J]. *Journal of HUST (Urban Science Edition)*, 2004, 21(1): 40 ~ 43. (in Chinese)
- [9] Stone K C, Hunt P G, Novak J M, et al In-stream wetland design for non-point source pollution abatement [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, 19(2): 171 ~ 175
- [10] Schulz R, Peall S K C. Effectiveness of a constructed wetland for retention of nonpoint source pesticide pollution in the Lourens River catchment, South Africa [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 422 ~ 426
- [11] 鲁敏, 曾庆福 七种植物的人工湿地处理生活污水的研究 [J]. 武汉科技学院学报, 2004, 17(2): 32 ~ 35.
LU Min, ZENG Qingfu Study on treatment of domestic sewage by constructed wetland planted with seven wetland plants [J]. *Wuhan University of Science and Engineering*, 2004, 17(2): 32 ~ 35. (in Chinese)
- [12] 廖新, 骆世明 香根草和凤车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 719 ~ 722.
LIAO Xindi, LUO Shiming Effects of constructed wetlands on treating with nitrogen and phosphorus in wastewater from hogger [J]. *Chinese Applied Ecology*, 2002, 13(6): 719 ~ 722. (in Chinese)
- [13] 赵文, 董双林, 申屠青春, 等 盐碱池塘水生大型植物研究 [J]. 植物研究, 2001, 1: 23 ~ 28.
ZHAO Wen, DONG Shuanglin, SHENTU Qingchun, et al Studies of aquatic macrophytes in saline-alkaline ponds [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2001, 21(1): 140 ~ 146. (in Chinese)

科技简讯

清华大学新能源电动汽车研发进展

在国家“八六三”电动汽车重大专项中,清华大学牵头承担了“燃料电池城市客车”重大项目。经过几年的努力,取得了重要进展。

在核心技术方面,大胆采用与国际同领域权威单位不同的技术路线,开发出了独具特色的能量混合型和功率混合型两种燃料电池混合动力系统,现已成为国际上主流系统构型。在整车集成方面,已研制出“清能1号、2号、3号”3辆燃料电池城市客车,其主要性能指标(燃料经济性)大大优于国际主流车型。目前,已经过了30 000 km的道路考核试验。通过北京国际氢能论坛、上海国际清洁汽车比赛等国际展示活动,得到国际同行的广泛认可与高度评价。

(摘自 <http://news.tsinghua.edu.cn>, 2006-01-13)