

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第15期 Vol.32 No.15 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 15 期

2012 年 8 月 (半月刊)

目 次

放牧对青藏高原东部两种典型高寒草地类型凋落物分解的影响.....	张艳博, 罗 鹏, 孙 庚, 等 (4605)
北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素.....	王苏铭, 张 楠, 于琳倩, 等 (4618)
温带混交林碳水通量模拟及其对冠层分层方式的响应——耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡模型	施婷婷, 高玉芳, 袁凤辉, 等 (4630)
洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响	刘 娜, 王克林, 段亚锋 (4641)
大辽河口水环境污染生态风险评估.....	于 格, 陈 静, 张学庆, 等 (4651)
标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数	渠晓东, 刘志刚, 张 远 (4661)
不同年龄段大连群体菲律宾蛤仔 EST-SSR 多样性	虞志飞, 闫喜武, 张跃环, 等 (4673)
基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性	杨晓明, 戴小杰, 朱国平 (4682)
广东罗坑自然保护区鳄蜥生境选择的季节性差异.....	武正军, 戴冬亮, 宁加佳, 等 (4691)
甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质.....	魏 强, 凌 雷, 柴春山, 等 (4700)
短轮伐期毛白杨不同密度林分土壤有机碳和全氮动态.....	赵雪梅, 孙向阳, 康向阳, 等 (4714)
放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响.....	丁小慧, 官 立, 王东波, 等 (4722)
UV-B 辐射增强对抗除草剂转基因水稻 CH ₄ 排放的影响	娄运生, 周文麟 (4731)
基于核磁共振波谱的盐芥盐胁迫代谢组学分析.....	王新宇, 王丽华, 于 萍, 等 (4737)
广西甘蔗根际高效联合固氮菌的筛选及鉴定.....	胡春锦, 林 丽, 史国英, 等 (4745)
不同稻蟹生产模式对土壤活性有机碳和酶活性的影响.....	安 辉, 刘鸣达, 王耀晶, 等 (4753)
大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征.....	白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (4762)
川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态.....	崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 等 (4772)
内生真菌角担子菌 B6 对连作西瓜土壤尖孢镰刀菌的影响	肖 逸, 戴传超, 王兴祥, 等 (4784)
西江颗粒直链藻种群生态特征.....	王 超, 赖子尼, 李跃飞, 等 (4793)
大型人工湿地生态可持续性评价.....	张依然, 王仁卿, 张 建, 等 (4803)
孢粉、炭屑揭示的黔西高原 MIS3b 期间古植被、古气候演变	赵增友, 袁道先, 石胜强, 等 (4811)
树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (4819)
豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系	杨 宁, 赵护兵, 王朝辉, 等 (4827)
一次陆源降雨污水引起血红哈卡藻赤潮的成因.....	刘义豪, 宋秀凯, 靳 洋, 等 (4836)
盐城国家级自然保护区景观格局变化及其驱动力.....	王艳芳, 沈永明 (4844)
城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例.....	邵天然, 李超骥, 曾 辉 (4852)
黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势.....	王介勇, 吴建寨 (4861)
重庆市生态功能区蝴蝶多样性参数	李爱民, 邓合黎, 马 琦 (4869)
专论与综述	
干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展.....	王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等 (4890)
土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素.....	栾军伟, 刘世荣 (4902)
森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展.....	程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等 (4914)
湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展	范俊楠, 赵建伟, 朱端卫 (4924)
研究简报	
刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响.....	吕改云, 何怀东, 杨丹菁, 等 (4932)
学术信息与动态	
全球气候变化与粮食安全——2012 年 Planet Under Pressure 国际会议述评	安艺明, 赵文武 (4940)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-08



封面图说: 水杉是中国特有种, 国家一级保护植物, 有植物王国“活化石”之称, 是 1946 年由中国的植物学家在湖北的利川磨刀溪发现的。水杉曾广泛分布于北半球, 第四纪冰期以后, 水杉属的其他种类全部灭绝, 水杉确在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存, 成为旷世奇珍。水杉耐水, 适应力强, 生长极为迅速, 其树干通直挺拔, 高大秀颀, 树冠呈圆锥形, 姿态优美, 枝叶繁茂, 入秋后叶色金黄。自发现后被人们在中国南方广泛种植, 成为著名的绿化观赏植物, 现在中国水杉的子孙已遍及中国和世界 50 多个国家和地区。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201107181064

吕改云,何怀东,杨丹菁,蔡信德,靖元孝. 刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响. 生态学报, 2012, 32(15): 4932-4939.

Lǚ G Y, He H D, Yang D J, Cai X D, Jing Y X. Cutting effects on growth and wastewater purification of *Cyperus alternifolius* in constructed wetland. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4932-4939.

刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响

吕改云¹, 何怀东¹, 杨丹菁², 蔡信德³, 靖元孝^{1,*}

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广州 510631

2. 广州市环境保护科学研究院, 广州 510620; 3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 刈割对人工湿地植物的生长和净化作用的影响, 国内外学者的意见存在分歧。实验于 2010 年 7 月至 2011 年 1 月在华南师范大学生物园进行。利用水池(2m×2m×0.6m)构建风车草人工湿地生活污水处理系统, 研究了刈割对人工湿地风车草生长和污水净化效果的影响。结果表明, 刈割组风车草在整个实验过程中均保持着良好的生长态势, 而对照组在 11 月以后生长减缓。刈割组风车草 2010 年 7 月至 2011 年 1 月的累积地上生物量、累积地上氮磷含量以及新增分蘖数均大于对照组, 表现为超补偿生长。刈割组风车草的叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率和气孔传导率均显著高于对照组。刈割组和对照组的 TN、TP、NH₄-N 和 NO₃-N 的平均去除率分别为 77%、84%、64%、72% 和 65%、67%、55%、63%, 前者显著大于后者。刈割组和对照组的 COD_{cr} 和 BOD₅ 平均去除率分别为 58%、79% 和 54%、76%, 两者差异不显著。总之, 刈割对人工湿地风车草的生长和污水净化效果有明显的促进作用, 这可为风车草人工湿地的科学管理提供参考。

关键词: 刈割; 风车草; 人工湿地; 生长; 污水净化

Cutting effects on growth and wastewater purification of *Cyperus alternifolius* in constructed wetland

Lǚ Gaiyun¹, HE Huaidong¹, YANG Danjing², CAI Xinde³, JING Yuanxiao^{1,*}

1 Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631 China

2 Guangzhou Research Academy of Environmental Protection, Guangzhou 510620 China

3 Ministry of Environmental Protection, South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510655, China

Abstract: There are ongoing debates about cutting effects on the growth and wastewater purification of plants in constructed wetlands. This experiment was carried out in the Biological Park, South China Normal University from July 2010 to January 2011. Constructed wetlands (2m×2m×0.6m) were grown with *Cyperus alternifolius* to assess cutting effects on growth and wastewater purification. The growth rate of *C. alternifolius* remained high for the treatment (cutting) group during the entire experiment period but was low for the control (no cutting) group after November 2010. At the end of the experiment, accumulated aboveground biomass, nitrogen and phosphorus contents, and new tillers from July 2010 to January 2011 in the treatment group were higher than those in the control group, and *C. alternifolius* showed overcompensation growth. The chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance in the treatment group were evidently higher than those of the control group. The average removal rates of TP, TN, NH₄-N and NO₃-N in the treatment and the control group were 77%, 84%, 64%, 72% and 65%, 67%, 55%, 63%, respectively, which were significantly higher in the treatment than the control group. The average removal rates of COD_{cr} and BOD₅ in treatment and the control

基金项目: 广东省攻关项目(2005B33302014)

收稿日期: 2011-07-18; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jingyx@scnu.edu.cn

group were 58% , 79% and 54% , 76% , respectively, which were not significantly different. These findings suggested that a positive effect of cutting on growth and wastewater purification of *C. alternifolius* in constructed wetlands, which may provide insightful information on the management of constructed wetlands.

Key Words: Cutting; *Cyperus alternifolius*; Constructed wetland; Growth; Wastewater purification

作为人工湿地的重要组成部分,植物在污染物净化中起着不可替代的作用。一方面植物为人工湿地传输氧气供微生物利用,另一方面植物对污水中可利用态的营养物质还起着吸收、利用和转化作用。但是,当人工湿地植物密度过大、部分器官衰老时,湿地对污水的净化效果会受到一定的影响。一方面人工湿地系统中植物生长在春夏季,但在秋季开始凋落,在冬季降解,增加了系统中的有机质,从而增加系统内部营养负荷,引起二次污染并极易造成系统的堵塞;另一方面高密度地上部分的遮蔽还限制了光分解作用,而这对于杀死病原体很重要。因此,人工湿地植物的周期性收割是一个值得讨论的问题^[1-2]。目前关于刈割对人工湿地植物的生长和净化作用的影响,国内外学者的意见存在分歧。一些学者提倡刈割,他们认为刈割可以促进植物生长,增强植物对污水氮和磷的吸收能力,增加植物生物量和氮磷贮存量,同时还可以有效避免凋落物进入人工湿地发生二次污染,从而提高净化效果^[2-4]。另一些学者则不赞成刈割,他们认为刈割对污染物的去除没有明显的影响,特别是当污水营养负荷较高时,通过收获植物而去除的营养物相对于营养物的输入量是无意义的^[5-7]。在热带和亚热带,风车草(*Cyperus alternifolius*)是用于构建人工湿地的优秀物种之一,它全年保持生长,即使在冬天仍能维持一定的生长速率,根系发达,根生物量大,在人工湿地表现出很强的净化能力^[8-10]。本实验以风车草为材料,研究刈割对人工湿地风车草生长和净化效果的影响,以期为人工湿地的科学管理提供策略。

1 材料和方法

1.1 风车草人工湿地的构建

实验于2010年3月至2011年1月在广州华南师范大学生物园进行。广州属亚热带气候,年平均气温22℃,最冷月1月和最热月7月平均气温分别为13.3℃和28.4℃,年平均降雨量1694mm。潜流型人工湿地池尺寸为2m×2m×0.6m,填料由下至上分别为:粗砾石(粒径为20mm)、细砾石(粒径为10mm),每种填料的厚度均为30cm。人工湿地中沿对角线埋入直径为20mm的PVC管,管壁有小孔,人工湿地的水可以进入其中,方便水样采集。生活污水来自华南师范大学学生宿舍化粪池,污水COD_{Cr}:90—270 mg/L、BOD₅:40—80 mg/L、TN:20—45 mg/L、TP:1.5—5.5 mg/L、NH₄-N:15—36 mg/L。用水泵从化粪池出水口抽取污水,至蓄水池中沉淀、过滤,进行调蓄后进入各湿地池中进行处理,每周灌污水一次。污水通过湿地床上部基质中的布水管流入,处理后的水从湿地池底部排出。2010年3月,选取长势良好、株高50cm的风车草移栽到人工湿地。每个水池移栽25丛,每丛5个分蘖,生物量为250g。实验设对照组(未刈割)和刈割组(留茬20cm),每组3个重复,另设1个湿地池用于计算风车草的初始生物量。

1.2 采样与测定方法

1.2.1 水样的采集与分析方法

进水样采集:用采水器在蓄水池中沿对角线布设3点采水,于16L桶中充分混合,用虹吸法将污水转移到1L的采样瓶中。处理后水样采集:污水在人工湿地停留2d后,用橡皮管插入人工湿地床中的PVC管中,橡皮管插入深度分别为10、20、35cm,用虹吸法将水吸出,将3种不同位置、不同深度的水样于16L的桶中充分混合,然后再用橡皮管虹吸转入1L的采样瓶中。刈割组和对照组均在3个湿地池采集水样。从2010年7月开始,每隔15d采集水样分析1次。考虑到降雨对污水的稀释作用,尽量避免在降雨期间进行水样采集和分析。在采集处理后水样前,如果因蒸发和蒸腾作用导致湿地池水量减少,可补充自来水,保持湿地水量平衡,同时计算补充自来水中无机物和有机物的含量。

水质分析项目包括 TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 BOD_5 和 COD_{Cr} , 方法如下: TN 采用过硫酸钾-紫外分光光度法, $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用纳氏试剂光度法, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用紫外分光光度法, TP 采用钼锑抗分光光度法, BOD_5 采用稀释接种法, COD_{Cr} 采用重铬酸钾法^[11]。

1.2.2 植物生长状况、生物量和植物体氮磷含量测定

2010 年 7 月刈割组离基质表面 20cm 收割植物, 并测定刈割部分的生物量和氮磷含量。与此同时, 收获一个湿地池的全部植物, 计算风车草初始生物量和氮磷含量。2011 年 1 月收获对照组和刈割组的全部植物, 并计算各部分的生物量和氮磷含量。植物分成地上和地下部分, 用精度 0.1g 天平称取各器官新鲜材料 100—500g 左右, 在 80℃ 烘箱中烘干 48h, 用精度 0.1mg 电子天平称干重。根据含水量计算植株干重。分别称取烘干的植物地上和地下部分, 用硫酸-过氧化氢进行消化, 冷却稀释后, 其氮、磷含量分别采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法和钼锑抗分光光度法测定。刈割组和对照组均在 3 个湿地池进行测定。

1.2.3 植物光合特性测定

2010 年 11 月, 用便携式光合系统 (LICOR-6400, LI-COR Inc., USA) 于 9:00—11:30 在 2cm×3cm 标准叶室中测定叶片净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率等气体交换参数。测定过程中, 用 LI-6400-02B 红蓝光源提供 $800\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光合有效辐射, 用 CO_2 钢瓶将参比室的 CO_2 浓度稳定在 $370\mu\text{mol}/\text{mol}$, 叶室温度控制在大约 30℃, 叶片在叶室中至少适应 5min 直到气体交换参数变化稳定为止。叶绿素含量按照 Lichtenthaler^[12] 等的方法测定。刈割组和对照组均在 3 个湿地池进行测定, 每个湿地池均选取 3 株风车草。

1.4 数据处理

采用 SPSS 统计软件计算各指标的平均值和标准差, 采用方差分析 (ANOVA) 检验差异的显著性。

1.5 补偿指数及补偿模式的确定

刈割植株与对照植株累积地上生物量 (刈割部分+现存地上生物量) 的比值作为刈割后植物的反应指标, 定义为补偿指数。根据补偿指数, 结合 ANOVA 检验结果判断补偿反应模式。若补偿指数大于 1, 且刈割处理植株与对照植株之间存在显著差异, 则为超补偿; 若补偿指数稍大于、等于或稍小于 1, 且方差分析不显著, 则为等量补偿; 若补偿指数小于 1, 且方差分析显著, 则判断为不足补偿^[13]。

2 结果与分析

2.1 刈割对风车草生长的影响

2.1.1 株高和分蘖数

2010 年 7 月刈割时, 风车草生长旺盛, 株高和分蘖数分别为 (130 ± 12) cm 和 (188 ± 16) 个/ m^2 。2011 年 1 月收获植物时, 刈割组和对照组风车草株高均在 (160 ± 10) cm, 分蘖数分别为 (498 ± 52) 和 (510 ± 49) 个/ m^2 , 两者差异不显著 ($P>0.05$)。然而, 2010 年 7 月至 2011 年 1 月刈割组和对照组的新增分蘖数分别为 (498 ± 51) 和 (322 ± 29) 个/ m^2 , 前者显著大于后者 ($P<0.05$)。由此可知, 刈割可以促进风车的分蘖能力。

2.1.2 生物量和氮磷含量

刈割对人工湿地风车草生物量、氮含量和磷含量的影响分别见表 1、表 2 和表 3。

由表 1 可知, 2011 年 1 月收获植物时, 刈割组和对照组风车草的地上和地下生物量分别为 5311、5096 和 5281、5019g/ m^2 , 两处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。2010 年 7 月至 2011 年 1 月刈割组和对照组风车草累积地上生物量分别为 4780 和 2454g/ m^2 , 前者明显大于后者 ($P<0.05$)。此外, 风车草刈割后补偿指数为 1.52, 表现为超补偿生长。

由表 2 可知, 2011 年 1 月收获植物时, 刈割组和对照组风车草的地上和地下氮含量分别为 89086、83548 和 88740、84369mg/ m^2 , 两处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。2010 年 7 月至 2011 年 1 月刈割组和对照组风车草累积地上氮含量分别为 82201 和 30824mg/ m^2 , 前者是后者的 2.7 倍。

由表 3 可知, 2011 年 1 月收获植物时, 刈割组和对照组风车草的地上和地下磷含量分别为 19725、18057 和 19182、18358mg/ m^2 , 两处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。2010 年 7 月至 2011 年 1 月刈割组和对照组风车

表 1 刈割对风车草生物量的影响

Table 1 Cutting effect on the biomass of <i>C. alternifolius</i> (g/m ²)						
处理 Treatment	2010 年 7 月收获 Harvest in July 2010		2011 年 1 月收获 Harvest in January 2011		2010 年 7 月至 2011 年 1 月 From July 2010 to January 2011	
	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Belowground biomass	刈割生物量 Cutting biomass	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Belowground biomass	累积地下生物量 Accumulated belowground biomass
对照组 Control	2827±152	2678±158		5281±188a	5019±206a	2341±106a
刈割组 Cutting	2827±152	2678±158	2296±125	5311±212a	5096±222a	2418±185a
刈割组累积地上生物量=2011 年 1 月地上生物量+2010 年 7 月刈割生物量,其他累积生物量=2011 年 1 月生物量-2010 年 7 月生物量;表中数据为平均值±标准差,同一列字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性						
						1.52

字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性

表 2 刈割对风车草氮含量的影响

Table 2 Cutting effect on nitrogen content of <i>C. alternifolius</i> (mg/m ²)						
处理 Treatment	2010 年 7 月收获 Harvest in July 2010		2011 年 1 月收获 Harvest in January 2011		2010 年 7 月至 2011 年 1 月 From July 2010 to January 2011	
	地上氮含量 Aboveground N content	地下氮含量 Belowground N content	刈割氮含量 Cutting N content	地上氮含量 Aboveground N content	地下氮含量 Belowground N content	累积地上氮含量 Accumulated aboveground N content
刈割组 Control	57916±3512	53650±3123		88740±5005a	84369±4626 a	30719±1605a
刈割组 Cutting	57916±3512	53650±3123	51031±2216	89086±4897a	83548±4282a	29898±1783a
刈割组累积地上氮含量=2011 年 1 月地上氮含量+2010 年 7 月刈割氮含量,其他累积氮含量=2011 年 1 月氮含量-2010 年 7 月氮含量;表中数据为平均值±标准差,同一列字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性						
						29898±1783a

字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性

表 3 刈割对风车草磷含量的影响

Table 3 Cutting effect on phosphorus content of <i>C. alternifolius</i> (mg/m ²)						
处理 Treatment	2010 年 7 月收获 Harvest in July 2010		2011 年 1 月收获 Harvest in January 2011		2010 年 7 月至 2011 年 1 月 From July 2010 to January 2011	
	地上磷含量 Aboveground P content	地下磷含量 Belowground P content	刈割磷含量 Cutting P content	地上磷含量 Aboveground P content	地下磷含量 Belowground P content	累积地上磷含量 Accumulated aboveground P content
刈割组 Control	11354±625	10548±575		19182±1253a	18358±1178a	7810±525a
刈割组 Cutting	11354±625	10548±575	10238±698	19725±1552a	18057±1025a	7509±435a
刈割组累积地上磷含量=2011 年 1 月地上磷含量+2010 年 7 月刈割磷含量,其他累积磷含量=2011 年 1 月磷含量-2010 年 7 月磷含量;表中数据为平均值±标准差,同一列字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性						
						7509±435a

字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性

草累积地上磷含量分别为 18609 和 7828mg/m²,前者是后者的 2.4 倍。由此可见,刈割可以促进风车草对氮磷的吸收和地上部分的生长,进而增加地上部分生物量和氮磷的积累,而地下部分的生长、生物量和氮磷的积累没有受到影响。

3.2 刈割对风车草光合特性的影响

刈割 4 个月后(2011 年 11 月)风车草光合特性见表 4。由表 4 可知,刈割组叶绿素含量、净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率分别为对照组的 220%、116%、145% 和 142%,刈割组显著高于对照组($P<0.05$)。由此可知,刈割可以提高风车草的光合能力。

表 4 刈割对风车草光合特性的影响

Table 4 Cutting effect on photosynthetic characteristics of *C. alternifolius*

处理 Treatment	叶绿素含量 Chl /(mg/g FW)	净光合速率 P_N /($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔传导率 g_s /($\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 E /($\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
对照组 Control	1.52±0.11a	8.81±0.42a	107.12±6.25a	2.38±0.18a
刈割组 Cutting	3.35±0.29b	10.18±0.98b	155.15±9.85b	3.37±0.28b

表中数据为平均值±标准差,同一列字母不同者表示差异显著($P<0.05$)

3.3 刈割对风车草人工湿地净化效果的影响

3.3.1 TN 和 TP 的净化效果

图 1 结果表明,在整个实验过程中,刈割组风车草人工湿地的 TN 和 TP 去除率一直高于对照组,平均值分别为 77%、84% 和 65%、67%,刈割组显著高于对照组($P<0.05$)。由此可见,刈割能显著提高人工湿地对 TN 和 TP 的去除效果。另外,刈割组和对照组 TN 和 TP 去除率具有相似的季节变化规律。8—11 月两组的 TN 和 TP 去除率均维持在较高水平,12 月随着温度不断下降,两组的 TN 和 TP 去除率大幅下降,最低值分别为 59%、58% 和 47%、31%。

3.3.2 COD_{Cr} 和 BOD₅ 的净化效果

图 1 结果表明,在整个实验过程中,刈割组和对照组风车草人工湿地的 COD_{Cr} 和 BOD₅ 去除率平均值分别为 58%、79% 和 54%、76%,两者差异不显著($P>0.05$)。另外,刈割组和对照组 COD_{Cr} 和 BOD₅ 去除率具有相似的季节变化规律。8—11 月两组的 COD_{Cr} 和 BOD₅ 去除率均维持在较高水平,12 月随着温度不断下降,两组的 COD_{Cr} 和 BOD₅ 去除率大幅下降,最低值分别为 38%、65% 和 31%、61%。

2.2.3 NH₄-N 和 NO₃-N 的净化效果

刈割组和对照组对生活污水 NH₄-N 和 NO₃-N 去除率见图 1。结果表明,在整个实验过程中,刈割组风车草人工湿地的 NH₄-N 和 NO₃-N 去除率一直高于对照组,平均值分别为 64%、72% 和 55%、63%,刈割组显著高于对照组($P<0.05$)。由此可见,刈割能显著提高人工湿地对 NH₄-N 和 NO₃-N 的去除效果。

4 讨论

4.1 刈割促进了风车草的生长

刈割是草业生产中较为常见的管理方式,能提高草本植物地上部分的再生能力,对草本的群体结构、生理生态、生物量以及草地生态系统产生各种不同的影响^[14]。当植物刈割后,植物往往会进行补偿生长,这种补偿生长现象是植物在受到阈值内的胁迫压力之后,在具有恢复因子和过程条件下,在构建和生理水平上产生的一种有利于植物生长发育和产量形成的能力^[15]。关于刈割后植物超补偿发生的机制研究很多,普遍认为刈割能通过刺激光合作用、增加生物量^[13,16]、产生更多的分蘖^[17-19]或改变资源分配模式^[20-21]来促进植物生长。普遍认为移去顶芽可刺激植物的分蘖,分蘖的增加可能与刈割刺激休眠芽的活动有关^[22]。本研究中,刈割组风车草再生能力提高,新增分蘖明显大于对照组,研究结果支持刈割刺激休眠芽活动的观点。

叶绿素作为光合色素,参与光合作用中光能的吸收、传递和转化,在植物光合作用中起着关键性作用。净光合速率作为光合作用强弱的一个重要指标,决定着干物质的产量。本研究中,刈割组风车草的叶绿素含量、

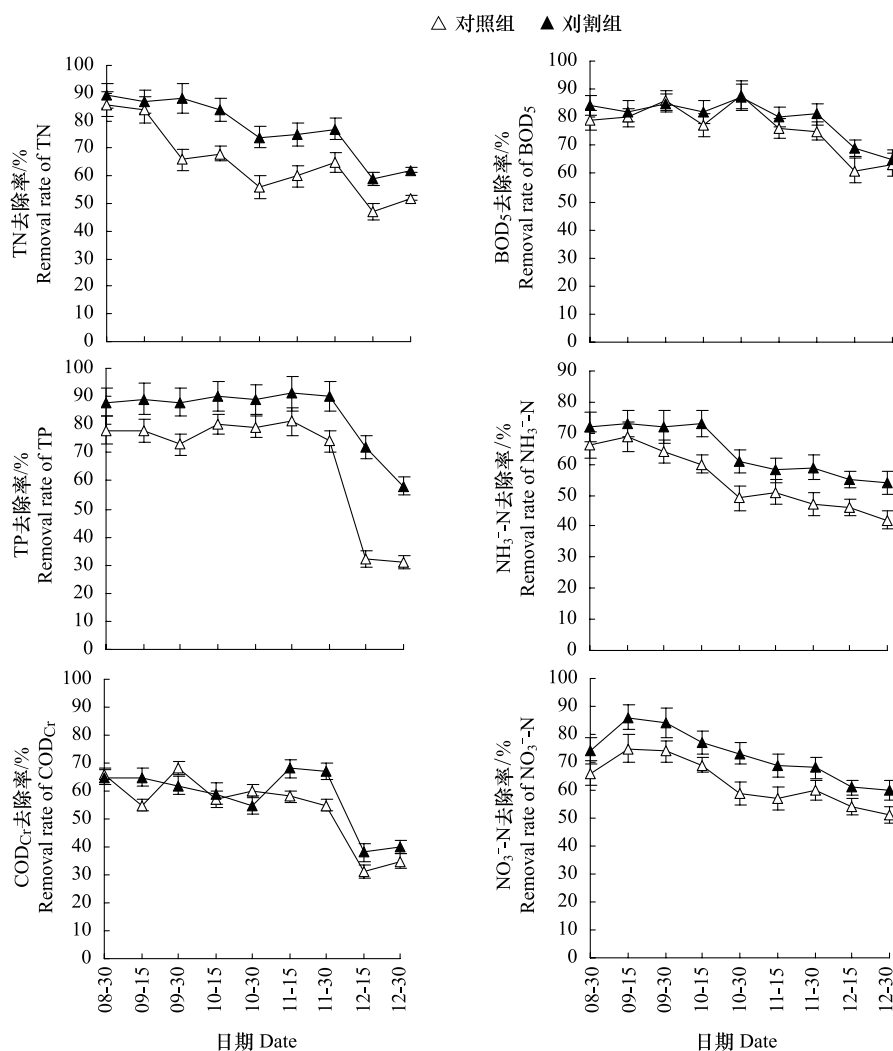


图1 刈割对人工湿地风车草净化效果的影响

Fig.1 Cutting effect on purification efficiencies of *C. alternifolius* in constructed wetland

净光合速率、地上部分生物量积累均高于对照组(表1、表4),表现为超补偿生长。因此,刈割有利于风车草对光能的利用,提高了植物的光合能力,增加了生物量的积累。

4.2 刈割提高了风车草人工湿地对污水的净化效果

关于刈割对人工湿地植物生长和净化作用的影响,国内外学者的研究结果相差甚远。Toet 等^[6]研究结果表明,连续两年于10月收获植物地上部分,人工湿地 *Phragmites australis* 和 *Thypha latifolia* 的生长没有受到影响。当N和P的营养负荷低于 $120 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $30 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,通过收割植物而去除的营养物是有用的,但在更高的营养物负荷时,通过收获植物而去除的营养物相对于营养物的输入量是无意义的。Hu^[3]等在太湖研究水生植物对富营养化水体的净化作用,结果表明在低营养负荷条件下,植物收割可以提高氮的去除效果。Vymazal^[4]等研究结果表明多次收割有利于 *Phalaris arundinacea* 人工湿地对微量元素的去除。Jinadasa 等^[23]研究结果表明 *Scirpus grossus* 人工湿地中多次收割后植物仍能维持可持续的生物量产生,而 *Typha angustifolia* 人工湿地中多次收割后植物生长受到一定的影响。Kim 等^[5]研究了植物收割对人工湿地TP去除率的影响,结果表明 *Schoenoplectus mucronatus* 人工湿地在高负荷条件下收割和未收割对TP的去除率差异不显著。Healy 等^[7]研究结果表明,在爱尔兰植物收割对人工湿地 *Phragmites australis* 生物量和氮磷含量没有任何有益的效果。上述研究结果差别较大,主要是因为湿地植物的直接吸收作用在人工湿地氮和磷去除中不占重要地

位^[24],通常湿地植物对氮和磷的吸收量小于城市污水负荷的 5%^[5],氮磷的植物吸收只是在低污染负荷系统中才具有数量上的重要性^[25-26]。

本试验中,刈割显著提高了风车草人工湿地 TN、TP、NH₄-N 和 NO₃-N 去除率(图 1)。这一结果可能与刈割促进了风车草的生长和提高了植物对污水中氮磷的吸收量有关。2010 年 7 月至 2011 年 1 月刈割组风车草地上部分累积的氮含量和磷含量分别为对照组的 2.7 和 2.4 倍(表 2、表 3)。

由于实验条件所限,本研究仅在 2010 年 7 月进行了 1 次、1 种强度的刈割处理。在保证湿地景观价值和净化效果的前提下,如何选择合适的刈割频率、刈割时间、刈割强度、刈割的植物如何有效利用,仍需深入研究。

5 结论

刈割可以促进人工湿地风车草的再生能力和分蘖能力,增加地上部分的生物量和氮磷贮存量,提高人工湿地对污水 TN、TP、NH₄-N 和 NO₃-N 的净化效果。这一结果可为风车草人工湿地的科学管理提供一定的参考。

致谢:感谢古滨河博士对本文写作的帮助。

References:

- [1] Thullen J S, Sartoris J J, Nelson S M. Managing vegetation in surface-flow wastewater-treatment wetlands for optimal treatment performance. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5): 583-593.
- [2] Álvarez J A, Bécares E. The effect of vegetation harvest on the operation of a surface flow constructed wetland. *Water SA*, 2008, 34(5): 645-649.
- [3] Hu L M, Hu W P, Deng J C, Li Q Q, Gao F, Zhu J G, Han T. Nutrient removal in wetlands with different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2010, 36(12): 1725-1732.
- [4] Vymazal J, Kröpfelová L, Švehla J, Štíhová J. Can multiple harvest of aboveground biomass enhance removal of trace elements in constructed wetlands receiving municipal sewage? *Ecological Engineering*, 2010, 36(7): 939-945.
- [5] Kim S Y, Geary P M. The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants. *Water Science and Technology*, 2001, 44(11/12): 61-67.
- [6] Toet S, Bouwman M, Cevaal A, Verhoeven J T S. Nutrient removal through autumn harvest of *Phragmites australis* and *Thypha latifolia* shoots in relation to nutrient loading in a wetland system used for polishing sewage treatment plant effluent. *Journal of Environmental Science and Health*, 2005, 40(6): 1133-1156.
- [7] Healy M G, Newell J, Rodgers M. Harvesting effects on biomass and nutrient retention in *Phragmites australis* in a free-water surface constructed wetland in western Ireland. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 2007, 107B(3): 139-145.
- [8] Kantawanichkul S, Pilaila S, Tanapiyanich W, Tikampornpittaya W, Kamkrua S. Wastewater treatment by tropical plants in vertical-flow constructed wetland. *Water Science and Technology*, 1999, 40(3): 173-178.
- [9] Jing Y X, Chen Z P, Yang D J. Purifying efficiency of *Cyperus alternifolius* to domestic sewage and its application in constructed wetland. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(6): 614-617.
- [10] Stecher M C, Weaver R W. Effects of umbrella palms and wastewater depth on wastewater treatment in a subsurface flow constructed wetland. *Environmental Technology*, 2003, 24(4): 471-478.
- [11] Environmental Protection Agency of Nation. *The Monitoring and Analytical Methods for Water and Wastewater*. 4th ed. Beijing China: Environment Science Press, 2002: 200-285.
- [12] Lichtenthaler H K, Wellbum A R. Determinations of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts, in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 1983, 11(8): 591-592.
- [13] Ma Y S, Du G Z, Zhang S T. The impacts of fertilization and clipping on compensatory growth of *Poa crymophila*. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 279-287.
- [14] Pei X, Guo Z, Li J Y, Zhang M, Ao Y S. Effects of cutting on regeneration and Cd-accumulation by *Solanum nigrum* L. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2007, 25(2): 125-130.
- [15] Shi J Y, Yuan X F, Ding G J. The reviews of study on water deficit compensation and over-compensation effect for crops. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2000, 19(3): 226-223.

- [16] Reich P B, Walters M B, Krause S D, Vanderklein D W, Raffe K F, Tabone T. Growth, nutrition and gas exchange of *Pinus resinosa* following artificial defoliation. *Trees-Structure and Function*, 1993, 7(2): 67-77.
- [17] Frank D A, McNaughton S J. Evidence for the promotion of aboveground grassland production by native large herbivores in Yellowstone National Park. *Oecologia*, 1993, 96(2): 157-161.
- [18] Nolet B A. Overcompensation and grazing optimisation in a swan-pondweed system? *Freshwater Biology*, 2004, 49(11): 1391-1399.
- [19] van Der Graaf A J, Stahl J, Bakker J P. Compensatory growth of *Festuca rubra* after grazing: can migratory herbivores increase their own harvest during staging? *Functional Ecology*, 2005, 19(6): 961-969.
- [20] Li B, Shibuya T, Yogo Y, Hara T. Effects of ramet clipping and nutrient availability on growth and biomass allocation of yellow nutsedge. *Ecological Research*, 2004, 19(6): 603-612.
- [21] Zhao W, Chen S P, Lin G H. Compensatory growth responses to clipping defoliation in *Leymus chinensis* (Poaceae) under nutrient addition and water deficiency conditions. *Plant Ecology*, 2008, 196(1): 85-99.
- [22] Wang H Y, Du G Z, Ren J J. The impacts of population density and fertilization on compensatory responses of *Elymus nutans* to mowing. *Acta phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 477-483.
- [23] Jinadasa K B S N, Tanaka N, Sasikala S, Werellagama D R I B, Mowjood M I M, Ng W J. Impact of harvesting on constructed wetlands performance — a comparison between *Scirpus grossus* and *Typha angustifolia*. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2008, 43(6): 664-671.
- [24] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1994, 29(4): 71-78.
- [25] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 11-17.
- [26] Lu S Y, Zhang P Y, Cui W H. Impact of plant harvesting on nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands treating agricultural region wastewater. *International Journal of Environment and Pollution*, 2010, 43(4): 339-353.

参考文献:

- [9] 靖元孝, 陈兆平, 杨丹菁. 风车草对生活污水的净化效果及其在人工湿地的应用. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(6): 614-617.
- [11] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 200-285.
- [13] 马银山, 杜国祯, 张世挺. 施肥和刈割对冷地早熟禾补偿生长的影响. *生态学报*, 2010, 30(2): 279-287.
- [14] 裴昕, 郭智, 李建勇, 张迈, 奥岩松. 刈割对龙葵生长和富集镉的影响及其机理. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2007, 25(2): 125-130.
- [15] 施积炎, 袁小凤, 丁贵杰. 作物水分亏缺补偿与超补偿效应的研究现状. *山地农业生物学报*, 2000, 19(3): 226-223.
- [22] 王海洋, 杜国祯, 仁金吉. 种群密度与施肥对垂穗披碱草刈割后补偿作用的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 477-483.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.15 August ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Effects of grazing on litter decomposition in two alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau	ZHANG Yanbo, LUO Peng, SUN Geng, et al (4605)
Distribution pattern and their influencing factors of invasive alien plants in Beijing	WANG Suming, ZHANG Nan, YU Linqian, et al (4618)
Simulation of CO ₂ and H ₂ O fluxes over temperate mixed forest and sensitivity analysis of layered methods: stomatal conductance-photosynthesis-energy balance coupled model	SHI Tingting, GAO Yufang, YUAN Fenghui, et al (4630)
Analysis on the responses of flood storage capacity of Dongting Lake to the changes of landscape patterns in Dongting Lake area	LIU Na, WANG KeLin, DUAN Yafeng (4641)
Integrated water risk assessment in Daliao River estuary area	YU Ge, CHEN Jing, ZHANG Xueqing, et al (4651)
Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity	QU Xiaodong, LIU Zhigang, ZHANG Yuan (4661)
Genetic diversity analysis of different age of a Dalian population of the Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i> by EST-SSR	YU Zhifei, YAN Xiwu, ZHANG Yuehuan, et al (4673)
Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) purse seine catch in the western Indian Ocean	YANG Xiaoming, DAI Xiaojie, ZHU Guoping (4682)
Seasonal differences in habitat selection of the Crocodile lizard (<i>Shinisaurus crocodilurus</i>) in Luokeng Nature Reserve, Guangdong	WU Zhengjun, DAI Dongliang, NIN Jiajia, et al (4691)
Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu	WEI Qiang, LING Lei, CHAI Chunshan, et al (4700)
Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen contents in short-rotation triploid <i>Populus tomentosa</i> plantations	ZHAO Xuemei, SUN Xiangyang, KANG Xiangyang, et al (4714)
Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mongolia	DING Xiaohui, GONG Li, WANG Dongbo, et al (4722)
Effect of elevated ultraviolet-B (UV-B) radiation on CH ₄ emission in herbicide resistant transgenic rice from a paddy soil	LOU Yunsheng, ZHOU Wenlin (4731)
NMR spectroscopy based metabolomic analysis of <i>Thellungiella salsuginea</i> under salt stress	WANG Xinyu, WANG Lihua, YU Ping, et al (4737)
Screening and identification of associative nitrogen fixation bacteria in rhizosphere of sugarcane in Guangxi	HU Chunjin, LIN Li, SHI Guoying, et al (4745)
Effects of different rice-crab production modes on soil labile organic carbon and enzyme activities	AN Hui, LIU Mingda, WANG Yaojing, et al (4753)
The characteristics of soil microbial communities at burned forest sites for the Great Xingan Mountains	BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (4762)
Changes of soil faunal communities during the restoration progress of <i>Abies faxoniana</i> Forests in Northwestern Sichuan	CUI Liwei, LIU Shirong, LIU Xingliang, et al (4772)
The effects of the endophytic fungus <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 on <i>Fusarium oxysporum</i> in a continuously cropped watermelon field	XIAO Yi, DAI Chuanchao, WANG Xingxiang, et al (4784)
Population ecology of <i>Aulacoseira granulata</i> in Xijiang River	WANG Chao, LAI Zini, LI Yuefei, et al (4793)
Evaluation of ecosystem sustainability for large-scale constructed wetlands	ZHANG Yiran, WANG Renqing, ZHANG Jian, et al (4803)
MIS3b vegetation and climate changes based on pollen and charcoal on Qianxi Plateau	ZHAO Zengyou, YUAN Daoxian, SHI Shengqiang, et al (4811)
The effects of stemflow on the formation of "Fertile Island" and "Salt Island" for <i>Haloxylon ammodendron</i> Bge	LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (4819)
Accumulation and translocation of dry matter and nutrients of wheat rotated with legumes and its relation to grain yield in a dryland area	YANG Ning, ZHAO Hubing, WANG Zhaohui, et al (4827)
Occurrence characteristics of <i>akashiwo sanguinea</i> bloom caused by land source rainwater	LIU Yihao, SONG Xiukai, JIN Yang, et al (4836)
Analysis on landscape pattern change and its driving forces of Yancheng National Natural Reserve	WANG Yanfang, SHEN Yongming (4844)
Resource potential assessment of urban roof greening and development strategies: a case study in Futian central district, Shenzhen, China	SHAO Tianran, LI Chaosu, ZENG Hui (4852)
Analysis of the dynamic coupling processes and trend of regional eco-economic system development in the Yellow River Delta	WANG Jieyong, WU Jianzhai (4861)
The diversity parameters of butterfly for ecological function divisions in Chongqing	LI Aimin, DENG Heli, MA Qi (4869)
Review and Monograph	
Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas	WANG Xinyuan, LI Yulin, ZHAO Xueyong, et al (4890)
Temperature sensitivity of soil respiration: uncertainties of global warming positive or negative feedback	LUAN Junwei, LIU Shirong (4902)
The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review	CHENG Shulan, FANG Huajun, YU Guirui, et al (4914)
The research progresses on biological oxidation and removal of nitrogen in lakes	FAN Junnan, ZHAO Jianwei, ZHU Duanwei (4924)
Scientific Note	
Cutting effects on growth and wastewater purification of <i>Cyperus alternifolius</i> in constructed wetland	LÜ Gaiyun, HE Huaidong, YANG Danjing, et al (4932)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 15 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 15 (August, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元