

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

北京市再生水利用生态环境效益评估

范育鹏, 陈卫平*

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 随着我国社会经济的快速发展和人口的持续增长, 我国面临着日益严峻的水资源问题, 再生水利用已成为解决水资源严重短缺、控制生态环境进一步恶化的有效措施。再生水利用不仅可以节约大量的新鲜水, 而且还可以降低污水排放对环境的影响, 具有巨大的生态环境效益, 包括资源效益、环境效益和对人体健康的效益等。本研究采用机会成本法构建了再生水利用生态环境效益的评价体系, 并以北京市为例对其再生水利用的生态环境效益进行了估算。结果表明, 2010 年北京市再生水利用具有可观的生态环境效益 12.0 亿, 其中再生水替代新鲜水的资源效益占比最大, 环境改善效益和地下水补给效益也较大, 其余效益较小或为负。北京市再生水利用的生态环境效益约为其直接经济收益的 1.8 倍, 说明北京市再生水利用符合可持续发展的理念。相关方法与研究成果可以为推动我国再生水利用的发展提供科学依据。

关键词: 效益分析; 再生水; 生态环境效益; 机会成本; 北京

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-4003-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.051

Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing

FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: With the rapid development of the social economy and the sustained growth of population, China is facing increasingly serious water problems, and reclaimed water utilization has become an effective measure to solve water shortage problem and to control further deterioration of the ecological environment. Reclaimed water utilization can not only save a lot of fresh water, but also reduce the environmental impact of wastewater discharge, and thus has great ecological environmental benefits, including resource, environmental and human health benefits and so on. This study used the opportunity cost method to construct an evaluation system for ecological environmental benefits of reclaimed water utilization, and Beijing was taken as an example to conduct an estimation of ecological environmental benefits of reclaimed water utilization. Research results indicated that the reclaimed water utilization in Beijing had considerable environmental benefits for ¥1.2 billion in 2010, in which replacement of fresh water accounted for the largest share. The benefits of environmental improvement and groundwater recharge were large, while the other benefits were small or negative. The ecological environment benefits of reclaimed water utilization in Beijing was about 1.8 times that of its direct economic benefits, showing that reclaimed water utilization was in accordance with sustainable development. Related methods and results will provide scientific basis to promote the development of reclaimed water utilization in our country.

Key words: benefit analysis; reclaimed water; ecological environmental benefits; opportunity cost; Beijing

解决水资源短缺是当下及未来人类面临的最严峻挑战之一, 许多国家和地区开始探寻更有效的水资源利用方法, 包括更广泛的接受使用非常规水源, 如海水淡化和远距离引水, 污水再生利用, 雨水收集回用等。相比之下, 污水回收再利用以其投资少、建设时间短、水源可靠和效果容易迅速实现的特点^[1]而具有重要意义。城镇污水再生利用可充分利用城镇污水资源, 提升我国城镇水资源综合利用效率和水平, 推动资源节约型和环境友好型社会的建设, 是一种环境友好技术^[2], 符合可持续发展的理念。Bixio 等^[3]提出再生水利用必须符合环境、社会文化和经济发展的需要。北京作为我国的首都和全国政治、文化中心, 特殊的战略地位以及建设现代

化国际大都市的目标对北京水资源保障提出了更高要求。而水资源的严峻形势也迫使北京市政府作出战略应对, 再生水利用日益变得重要, 2010 年北京市再生水利用达 6.8 亿 m³, 占城市水资源供应的 20%^[4]。

再生水利用工程具有较强的外部经济性。然而大多数情况, 由此产生的环境效益因其不具有市场价值而难以量化。尽管如此要论证再生水工程的经

收稿日期: 2014-02-26; 修订日期: 2014-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272531); 城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-1-4)

作者简介: 范育鹏(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生态价值评估、环境经济与管理, E-mail: ddahuanyu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

济可行性,评价这些环境效益的货币价值是必需的.根据经济理论采用基于市场关联假设的经济评估法,把非市场效益和市场效益组合起来考虑,才可以对水资源管理进行平衡的评估,进而形成高效和可持续的水资源管理.傅遐龄^[5]结合一个南方车辆段的实例,认为应从多方面入手,系统、全面地评估再生水回用的效益;吕立宏^[6]对再生水利用工程规划的实施建设所带来的经济效益、社会效益做了简单的定性分析;李健^[7]结合海河流域再生水的利用现状,分析了再生水利用的经济效益;王国友等^[8]结合重庆市的实际情况分析了该市再生水回用的环境经济效益,在假设的基础上对再生水回用改变水循环的环境经济效益进行了较为全面的分析.多数估值研究目的是为政策决策者提供支持,但很少把生态环境价值考虑进评估体系.针对再生水利用带来的无形的巨大生态环境效益常被忽略这种情况^[9],本研究借助机会成本法分析了再生水利用产生的非市场、非货币形式的生态环境效益,通过计算再生水回用工程中输出的隐蔽价值来对生态环境效益量化评价^[10],以期为推动再生水利用提供理论依据.

1 研究方法

再生水利用会产生一系列经济、社会和生态环境效益,本研究主要考虑再生水利用带来的生态环境收益,包括为生态系统提供资源的效益、避免环境损失的收益(减少污水排放)、环境质量提高的效益、人体健康损失、地下水补给与污染效益和土壤效益等.依据以上信息,本研究构建了再生水利用效益分析理论框架与方法,并以北京市为例估算了再生水利用工程产生的生态环境效益.

1.1 再生水利用生态环境效益分析

再生水利用产生的资源效益可使用再生水替代新鲜水和节省肥料产生的市场价值直接评价;再生水利用产生的环境效益、人体健康效益、地下水的效益,采用机会成本法分析;研究表明再生水灌溉对土壤产生的效益受气候、土壤、植被等多种因素影响,具有很大的不确定性,一方面再生水中的营养物质可在一定程度上改善土壤健康状况,另一方其有害物质如盐、重金属等在土壤中累积,其正负效益大致相当^[11,12],本研究不做分析.

(1)再生水的资源效益 由于再生水回用于冲厕、绿化等用途,节省了相当量的自来水;用于农业灌溉,则提供了肥料.这部分效益可用式(1)计算:

$$B_{11} = \sum_{i=1}^n (T_{p,i} - W_{p,i}) Q_i \quad (1a)$$

$$B_{12} = \sum_{f=1}^m Q_{ir} C_f P_f \quad (1b)$$

$$B_1 = B_{11} + B_{12} \quad (1c)$$

式中, B_{11} 为节省自来水的价值; $T_{p,i}$ 为*i*种用途自来水的价格; $W_{p,i}$ 为相应的再生水价格; Q_i 为再生水第*i*种用途的用量; B_{12} 为提供肥料的价值; Q_{ir} 为再生水灌溉量; C_f 为再生水中肥料*f*的含量; P_f 为肥料*f*的价格.

(2)再生水利用的环境效益 主要包括减少污水排放的效益,当地环境改善的效益.

①污水减排效益.污水排放会带来环境负外部性,实施再生水利用工程阻止污水排入城市水体可避免这一负外部性而产生效益.为了定量评价减少污水排放的效益,可以用节省的排污费替代这部分效益,国家环保部规定了排污费征收标准及计算方法^[13]:

$$B_{21} = \sum_{i=1}^x \varphi_i \frac{\rho_i}{1000n_i} Q \quad (2)$$

式中, φ_i 为单位污染当量的排污费; ρ_i 为污染物*i*的浓度; Q 为再生水总量; n_i 为污染物*i*的污染当量值; x 为污染物的种类数.

②环境改善效益.当地环境改善的收益从两方面获得,一方面阻止了污水排放造成的环境污染,另一方面由于使用再生水增加了绿化覆盖面,补给了人工池塘、湖泊,改善了当地居民生存环境.分别计算这两方面收益非常困难,可以作为一个整体收益考虑,等价于再生水中污染物没有进入收集处理系统,直接排放造成环境污染,要去除这些污染物的花费^[14].通过机会成本法^[15],这部分收益可用式(3)表示:

$$B_{22} = \sum_{i=1}^x h_i \rho_i Q \quad (3)$$

式中, h_i 为去除单位质量污染物*i*的花费.

(3)人体健康效益 再生水用于市政、绿化、园林补给,携带的病原微生物会以气溶胶形式传播,或直接接触人体,增加了人体接触病原的几率,增加致病几率.因而这部分收益是负的,根据胡大镛^[16]的研究,健康损失用式(4)计算:

$$B_3 = - \frac{\sum_{i=1}^m L_i}{m} = - \frac{P_0(1+\lambda)^{t-1} \left(\frac{TB}{35} + y \right) f_i + AD}{m} \quad (4)$$

式中, L_t 为某种疾病第 t 年水污染健康损失; P_0 为计算基年的人口数, 这里按一年间北京市暴露于公园等景观水体的人数计算; m 为计算期; λ 为当地人口的自然增长率; T 为因水污染造成的发病天数占年工作天数的比例; D 为当地一个人的生命价值, 可采用人的工作年龄范围内的当地人均国内生产总值之和代替; y 为患者的年治疗费用; f_t 为因水污染造成的第 t 年的发病率; A 为因水污染造成的死亡人数。

(4) 再生水对地下水的效益 这部分效益分为两个方面——污染地下水和补给地下水, 再生水长期灌溉, 下渗污染地下水, 造成负面效益, 可用治理污染费用替代计算。再生水补给地下水的效益可用地下水含水层产水量的价值计算。再生水对地下水影响的效益可用下式计算:

$$B_{41} = -\frac{17}{14}Q_d C k l r P \tag{5}$$

$$B_{42} = Q_r V \tag{6}$$

式中, Q_d 是下渗进入地下水的再生水量; C 是再生水中 N 的含量; k 是再生水中 N 淋溶到地下水的比例; l 是地下水开采的比重; r 是地下水中氨氮的去除率; P 是氨氮的单位去除成本; Q_r 是用于补给地下水的再生水量; V 是地下水资源费。

再生水利用的总效益为:

$$B = B_1 + B_{21} + B_{22} + B_3 + B_{41} + B_{42} \tag{7}$$

1.2 案例分析

本研究选取了北京市 2010 年再生水回用工程, 开展其再生水利用生态环境效益的评估。北京市 2010 年再生水年利用量达 6.8 亿 m^3 , 置换了大量清洁水源。其中工业领域利用再生水 1.4 亿 m^3 , 农业

领域利用再生水 3 亿 m^3 , 城市市政杂用方面利用再生水 0.3 亿 m^3 , 河湖水系等环境用水方面用水 2.1 亿 m^3 ^[17]。通过文献资料收集相关数据, 对本研究中定义的再生水效益进行逐项评估。

2 结果与讨论

2.1 资源效益

不同再生水用途其水肥资源收益不同。表 1 总结了北京市 2010 年再生水各种用途提供资源的收益。基于水价差和再生水利用量, 从工业、市政杂用和环境方面节省自来水的收益分别为 7.29、1.44 和 0.672 亿元人民币(表 1)。鉴于农业灌溉的实际情况, 在再生水用于农业灌溉节省的效益中本研究只考虑节省的提水费。在北京大约有 36 700 hm^2 再生水灌溉区域, 根据实地调查, 每年抽取地下水用作农业灌溉的动力成本大约是 600 元 $\cdot hm^{-2}$, 农业用再生水的起升高度为 2~3 m, 平均 2.5 m, 而平均地下水位深度是 22.9 m^[4], 再生水替代地下水使用于农业可减少 89% 的动力消耗, 这部分收益为 0.195 8 亿元。根据式(1)把 4 种类型的再生水节水收益(农业利用为节省动力)综合起来, 总效益 B_{11} 为 9.601 8 亿元。

再生水中含有 N、P 等营养元素, 用于农业灌溉可减少作物对肥料的需求。依据北京市水源六厂的三级处理出水水质, N、P 的平均浓度是 14.71 $mg \cdot L^{-1}$ 和 1.53 $mg \cdot L^{-1}$ ^[18]。因此, 2010 年北京市再生水灌溉可提供约 4 413 t 氮和 459 t 磷, 相当于 9 593 t 尿素和 7 009 t 过磷酸钙。每吨尿素和过磷酸钙市场价格是 2 300 元和 478 元, 因而, 再生水节省肥料的收益 B_{12} 是 0.254 1 亿元人民币。

表 1 2010 年再生水各种用途的提供水资源收益

Table 1 Water resource benefits provided by using the reclaimed wastewater in Beijing, 2010

用途	用水量/亿 m^3	自来水价/元 $\cdot m^{-3}$	再生水价/元 $\cdot m^{-3}$	节省价值/亿元
农业 ¹⁾	3.0	—	—	0.195 8
工业	1.4	6.21	1	7.294 0
景观	2.1	1.32	1	0.672 0
市政杂用	0.3	5.80	1	1.440 0

1) 农业计算的是节省的提水动力费用

2.2 环境效益

2.2.1 污水减排的效益

污水排放减少导致的收益可以通过计算相应减少的排污费来代替。按照我国实行的排污费征收办法^[13], 对向水体排放污染物的, 按照排放污染物的种类、数量以污染当量计征污水排污

费, 每一污染当量征收标准[式(2)中的 φ_i] 为 0.7 元。排放污染物的污染当量值参照环保部规定(表 2), 冯运玲等^[19]对北京的再生水厂进行了调查, 确定了出水中污染物的浓度[式(2)中的 ρ_i , 见表 3], 于是再生水中各种污染物的污染当量[式(2)中的 n_i] 就可以相应地获得。在征收污

水排污费时按污染当量数从多到少的顺序取其前 3 项,故对本研究来说,只考虑 SS、COD 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$. 根据式(3)得出减少污水排放的收益是 0.339 亿元.

表 2 2010 年北京再生水的污染当量
Table 2 Pollution equivalent of reclaimed wastewater
of Beijing in 2010

污染物	污染当量值 / kg^{-1}	污染物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	再生水的 污染当量
SS	4	20	3.4×10^6
COD	1	25	1.7×10^7
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.8	4.5	3.825×10^6
TP	0.25	1.0	2.72×10^6

2.2.2 环境质量改善的效益

环境质量改善的收益可通过机会成本法获取[式(3)],即环境质量提高的总收益 B_{22} 等同于污染控制和环境修复的花费,计算参数见表 3,其中计算单位质量污染物的去除成本 h_i 取自李俊奇等^[20]的研究,污染物 i 的浓度 ρ_i 取自冯运玲等^[19]的研究. 据以上相关信息,环境质量改善的收益估算为 3.52 亿人民币.

表 3 污染物去除成本参数

污染物	COD	SS	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP
去除成本 $h_i/\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.64	5.34	6.16	292.45
再生水中浓度 $\rho_i/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	25	20	4.5	1.0

2.3 人体健康效益

人体健康效益表现为再生水中致病物质通过直接或间接途径引起人体急慢性疾病,人患病后治疗和休养所需的治疗费、工时损失费和死亡的经济损失,其效益可通过式(4)进行估算. 北京市一年暴露于公园湖泊等景观水体的人数为 200 万人次^[21]. 2010 年全市医疗机构平均住院日为 13.7 d,加上门诊天数和休养时间,发病天数取 15 d. 工作天数取 250 d,则因水污染造成的发病天数占年工作天数的比例[式(4)中的 T]为 0.06,计算期是 1 a,人口的增长则不用考虑了. 北京市一个人的生命价值[式(4)中的 D]可采用人的工作年龄范围内的人均国内生产总值之和代替,2010 年北京人均 GDP 为 80 000 元,工作年限是 35 a,则 D 值为 280 万元. 根据统计信息^[22,23],患者的年治疗费用 y 约为 1.21 万元,因水污染造成的第 t 年的发病率 f_t 取 1%,因水污染造成的死亡人数 A 取 10(表 4). 根据以上相关信息,再生水利用产生的负面人体健康效益约是 -3.66 亿元.

表 4 评价 2010 年北京再生水利用对健康影响的参数

Table 4 Parameters for evaluation of public health impacts
due to reclaimed wastewater exposures in Beijing

参数	取值
暴露人数, P_0	2×10^6
计算期, m	1 a
发病天数占年工作天数的比例, T	0.06
人均生命价值, D	2.8×10^6 元
年治疗费用, y	12.1×10^3 元
由于暴露再生水的发病率, f_t	1%
因暴露再生水造成的死亡人数, A	10

2.4 地下水影响的效益

2.4.1 地下水污染的效益

只有农业灌溉、园林绿化和补给河湖的再生水才向地下下渗,故再生水利用对地下水的影响只考虑这些方面. 再生水中的 N 进入地下水造成水质下降的损失等价于恢复水质的成本,可通过式(5)进行计算. 2010 年北京市农业灌溉、园林绿化和补给河湖的再生水量 Q_d 为 5.1 亿 m^3 ,平均 N 浓度为 $14.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[18],再生水中共有 7 502 t 的 N. 根据文献^[24],大约 1% 的 N(75.02 t)会下渗入地下水中. 如果每年地下水产量 l 的 55% 被提取为市民供水^[25],含水层中 41.26 t 的 N 将被去除. 李焯等^[26]发现北京的地下水总氮中氨氮超标率为 24.1% ~ 62.0%,那么平均 43% 抽出地下水中的 N 即 17.74 t 需要被除去以达到饮用水质量标准,17.74 t 的 N 等价于 22.81 t $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除成本 P 是 $23.82 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由式(5)得出地下水污染的效益为 -54.3 万元.

2.4.2 地下水补给的效益

北京地区大部分是不透水层,补给条件不太理想,水下移很少见. 北京供水重要来源的永定河沿西北地质断层线流动,是北京盆地地下水主要的补给区. 据统计资料每年有 1.2 亿 m^3 的再生水供给永定河^[27],其中地下水补给量大约为 1.0 亿 m^3 ^[28],则每年向地下补给水量为 1 亿 m^3 ,地下水使用的平均收费为 $2 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$,故地下水补给的效益为 2 亿元.

2.5 生态环境总效益

综上计算得出 2010 年北京再生水利用带来的生态环境效益为 12.0 亿元,其中再生水替代新鲜水的资源效益占比最大,环境改善效益和地下水补给收益也较大,其余效益较小或为负(见表 5). 再生水利用的生态环境效益是 $1.76 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$,大约为售水收入的 1.8 倍(北京市再生水价格为 $1 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$).

生态环境效益对推动再生水利用提供了额外的刺激。在另一方面,再生水利用造成对公众健康的负效益(健康损失为 3.66 亿元)不容忽视,它往往成为阻碍再生水利用工程实施的最大障碍。

表 5 再生水效益¹⁾

Table 5 Benefits of water reuse

效益类别	效益
提供水资源 B_{11}	9.60
提供肥料 B_{12}	0.254
减少污水排放 B_{21}	0.339
环境改善 B_{22}	3.52
人体健康损失 B_3	-3.66
地下水污染 B_{41}	-0.005 43
地下水补给 B_{42}	2.00
总效益	12.0

1)单位:亿元人民币

3 结论

(1)北京市 2010 年再生水利用量达 6.8 亿 m^3 ,用于农业、工业、生态景观、市政杂用等各个行业或部门,减少了对常规水资源供给的负荷,减少了环境污染负荷,产生了资源效益以及其它生态环境效益。本研究以北京市为例对再生水利用的生态环境效益进行了系统分析,包括提供资源效益、环境改善效益、再生水对公众健康的效益及地下水的效益。结果表明,再生水利用带来的巨大生态环境效益达 12.0 亿元,为其直接售水经济收益的 1.8 倍,其中资源效益占据最大比重,说明再生水的首当属性是资源属性;环境效益也非常明显,说明再生水是环境友好型技术;地下水的效益也相当可观,说明再生水可作为地下水的稳定补给源;对人体的效益为负说明需提高再生水的暴露风险管理水平。

(2)本研究探索构建了再生水利用生态环境效益的评价体系。再生水利用对生态环境产生一系列的正面或负面的影响,需引入机会成本法才可量化评价这些非市场的效益,并对生态环境效益的计算考虑到了资源稀缺和环境污染这些重大典型的外部性问题。研究发现再生水利用是一项符合可持续发展的重大举措。再生水工程的实施必须要考虑到再生水利用所带来的外部性即生态环境效益,北京市的再生水利用可以为其他城市再生水利用事业发展提供参考。

参考文献:

[1] 张俊杰,曾思育,陈吉宁. 再生水与长距调水的费用——效果比较[J]. 中国给水排水, 2004, **20**(11): 22-24.
[2] United Nations Environment Programme and Global Environment Centre Foundation. Water and wastewater reuse; an

environmentally sound approach for sustainable urban water management[R]. United Nations, 2006. 48.
[3] Bixio D, Thoeye C, De Koning J, *et al.* Wastewater reuse in Europe[J]. Desalination, 2008, **187**(1-3): 89-101.
[4] 北京市水务局. 北京市水资源公报[M]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
[5] 傅遐龄. 谈再生水回用的效益[A]. 见: 中国铁道学会铁道环境保护委员会. 中国铁道学会环境保护委员会 2005 年年会论文集[C]. 北京: 中国铁道学会, 2005. 119-123.
[6] 吕立宏. 再生水利用经济效益和社会效益分析[J]. 科技创新导报, 2011, **8**(11): 135.
[7] 李健. 海河流域再生水利用现状及效益分析[J]. 水科学与工程, 2012, **36**(2): 53-55.
[8] 王国友,谭灵芝. 重庆地区再生水回用模式及环境经济效益研究[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(4): 312-316.
[9] Urkiaga A, Balasz B, Bis B, *et al.* Development of analysis tools for social, economic and ecological effects of water reuse[J]. Desalination, 2008, **218**(1-3): 81-91.
[10] Kuosmanen T, Kortelainen M, Sipiläinen T, *et al.* Firm and industry level profit efficiency analysis using absolute and uniform shadow prices[J]. European Journal of Operational Research, 2010, **202**(2): 584-594.
[11] 陈卫平,张炜铃,潘能,等. 再生水灌溉利用的生态风险研究进展[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4070-4080.
[12] Chen W P, Lu S D, Jiao W T, *et al.* Reclaimed water: A safe irrigation water source? [J]. Environmental Development, 2013, **8**: 74-83.
[13] 国家环境保护总局. 排污费征收标准管理办法[Z]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国财政部, 中华人民共和国国家环境保护总局, 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 第 31 号令, 北京, 2003.
[14] 姚志勇. 环境经济学[M]. 北京: 中国发展出版社, 2002.
[15] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
[16] 胡大镛. 建设项目环境损益评估方法[M]. 北京: 中国计划出版社, 1996.
[17] 李五勤,张军. 北京市再生水利用现状及发展思路探讨[J]. 北京水务, 2011, **36**(3): 26-28.
[18] 张娟,王艳春,田宇. 再生水灌溉对绿地土壤盐分指标和速效养分的影响[J]. 北京园林, 2009, **25**(4): 50-53.
[19] 冯运玲,戴前进,李艺,等. 几种典型再生水处理工艺出水水质对比分析[J]. 给水排水, 2011, **37**(2): 47-49.
[20] 李俊奇,张颖夏,向璐璐,等. 中小型城市污水处理厂技术经济调查与分析[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(10): 13-16.
[21] 北京市公园管理中心. 2010 年公园年票发售工作圆满结束[EB/OL]. <http://www.bjmacp.gov.cn/cn/tabs/showdetail.aspx?tabid=300201&iid=23604>, 2010-03-02.
[22] 北京市卫生局. 北京卫生年鉴[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2011.
[23] 北京市统计局. 北京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.

- [24] 杨庆, 郭萌, 刘予, 等. 北京利用土地处理技术将再生水回补地下水可行性探讨[J]. 城市地质, 2010, 5(1): 7-10.
- [25] 杨忠山, 窦艳兵, 王志强. 北京市地下水水位下降严重原因分析及对策研究[J]. 中国水利, 2010, 61(19): 52-54.
- [26] 李烨, 李建民, 潘涛. 地下水氨氮污染及处理技术综述[J]. 环境工程, 2011, 29(S1): 100-102.
- [27] 北京市水务局. 2012 年市水务局工作计划[EB/OL]. http://www.bjwater.gov.cn/pub/bjwater/zfgk/jhzj/201209/t20120917_162441.html, 2012-02-08.
- [28] 李云开, 杨培岭, 刘培斌, 等. 再生水补给永定河生态用水的环境影响及保障关键技术研究[J]. 中国水利, 2012, 63(5): 30-34.

欢迎订阅 2015 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

《环境科学》2015 年为大 16 开本,120 元/册,全年 12 期.

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行