

Study on Efficiency of Rainfall and Flood Water Resources Utilization in Coastal Area*

Xianfeng Huang^{1#}, Yingqin Chen², Guohua Fang¹, Lixiang Zhu³

¹College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing

²Department of Civil Engineering, Hohai University Wentian College, Ma'anshan

³Lianyungang Bureau Water Conservancy, Lianyungang

Email: [#]hxfhuang2005@163.com

Received: Jul. 11th, 2012; revised: Aug. 1st, 2012; accepted: Aug. 17th, 2012

Abstract: Due to the rich resources of urban rainwater and transit flood in coastal areas, rational utilization of rainfall and flood water resources can improve the sustainable utilization of water resources in coastal areas, to better serve the coastal development. In this paper, the available quantity of water rainfall and flood water resources in coastal are distributed to domestic water, industrial water, agricultural water and ecologic environmental water. Water price method is used to calculate domestic water efficiency. Energy synthesis is used to calculate the industrial and agricultural water-use efficiency. Ecologic environmental water-use efficiency-sharing coefficient method is used to calculate the ecologic environmental water-use efficiency. Finally, taking Lianyungang City, a Jiangsu coastal city as an example to analyze the rainfall and flood water resources utilization efficiency. The results provide a reference to the research for China's plain area rainfall and flood water resources benefit analysis.

Keywords: Rainfall and Flood Water Resources; Efficiency; Emery Analyzing Method; Coastal Area

沿海地区城市雨洪资源利用效益研究*

黄显峰^{1#}, 陈颖钦², 方国华¹, 朱丽向³

¹河海大学水利水电学院, 南京

²河海大学文天学院, 土木工程系, 马鞍山

³连云港市水利局, 连云港

Email: [#]hxfhuang2005@163.com

收稿日期: 2012年7月11日; 修回日期: 2012年8月1日; 录用日期: 2012年8月17日

摘要: 沿海地区城市雨水和过境洪水资源丰富, 对雨洪资源进行合理利用, 可以提高沿海地区水资源可持续利用程度, 更好服务于沿海地区发展。本文将沿海地区城市雨洪资源可利用量按生活用水、工业用水、农业用水和生态环境用水进行分配, 分别利用水价法计算生活用水效益, 利用能值分析法计算工业和农业用水效益, 利用生态环境用水效益分摊系数法计算生态环境用水效益, 最后以江苏沿海城市连云港市为例进行了雨洪资源利用效益分析。研究成果为我国沿海地区城市雨洪资源利用效益研究提供了新思路。

关键词: 雨洪资源; 效益; 能值法; 沿海地区

*基金项目: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金资助(2010B068); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2009B08414)。

[#]通讯作者。

作者简介: 黄显峰(1980-), 男, 湖北黄冈人, 河海大学副教授, 博士, 从事水资源系统分析研究。

1. 引言

我国是一个洪涝灾害频发的国家,洪涝灾害使人类生命和社会、经济及环境资产蒙受巨大损失。同时,缺水、水污染问题也日益突出。随着社会经济的快速发展,各个领域对水资源的需求也越来越大。目前对地表水、地下水等水资源的开发利用已经不能满足生产生活的需要,开发新的淡水资源成为迫在眉睫的任务。雨洪资源就是具有极大开发潜力的淡水资源。沿海地区位于流域下游,随着沿海开发战略的快速推进,这些区域对水资源的需求量也持续增加,水资源供给保障面临严峻考验,利用雨洪资源成为解决水资源短缺问题的一条出路。

2. 雨洪资源利用效益研究进展

雨洪资源利用效益是指采用各项措施后新增的水资源量产生的直接和间接效益,如促进工农业生产、提高居民生活标准、改善生态环境等。

国内外关于雨洪资源利用效益的研究较少。Yutaka Takahasi(2004)等对日本的河流管理的进程进行了回顾,从以往的集中在经济效益转变为现在的综合性管理^[1]。Hatibu(2010)对东非地区雨水利用的效益进行了分析,得出该区域雨水资源利用的可行性^[2]。国内城市雨洪资源利用效益的研究在近十年比较多。于琪洋(2002)从实践可持续发展治水思路出发,对城市雨洪资源利用进行了分析^[3];邵东国(2005)洪水资源利用的潜力进行了分析,提出了缺水损失法、分摊系数法用来计算工业供水效益^[4];鹿新高(2010)根据我国雨水资源的利用现状,结合我国南北城市降雨特点,对城市雨水资源开发潜力与效益分析^[5]。

总的来说,国内外关于雨洪资源利用的研究大多将“雨洪资源”视为一个整体概念,强调雨洪资源是由降雨而来的,侧重于雨水资源利用的研究,对于雨洪资源利用研究多以城市雨水及流域洪水研究为主,对雨洪资源利用的理论研究较为深入,但对于雨洪资源利用效益多以单一的雨水或洪水进行定性分析,缺乏对雨洪资源利用产生的效益进行统一系统地定量分析研究。

本文针对上述问题开展研究,将雨洪资源利用量按生活用水、工业用水、农业用水和生态环境用水进行分配,利用水价法生活用水效益,利用能值分析法

计算工农业用水效益,利用生态环境用水效益分摊系数法计算生态环境用水效益。

3. 沿海地区雨洪资源可利用量分配模式

雨洪资源可利用量包括城市雨水和过境洪水两部分。城市雨水可利用量是利用公共建筑设施的顶面、路面、绿地等措施能够收集储存的最大城市雨水资源量。过境洪水可利用量是在可预见时期内,在统筹考虑生活、生产和生态环境等必要需水量的基础上,在保障防洪安全的前提下,通过经济合理、技术可行的措施能够调控利用的最大过境洪水资源量。

将雨洪资源可利用总量进一步按照生活、农业、工业和生态用水进行分配:先考虑各类雨洪资源利用工程的供水分区和供水范围,统计各类雨洪资源利用工程所在区域,将雨洪资源可利用总量按行政区域进行一级分配;然后考虑生活、农业、工业和生态用水量、用水优先次序和缺水程度等因素,确定各类用水的分配系数,在各个区域内,按照生活、农业、工业和生态用水进行二级分配。

4. 沿海地区雨洪资源利用效益计算方法

本文将分别按生活用水、工业用水、农业用水和生态环境用水四个方面计算雨洪资源利用效益。

4.1. 生活用水效益计算

生活用水效益分农村生活和城镇生活用水效益,两者均以水量乘以水价粗略估算,其计算公式为:

$$E_1 = \sum_{i=1}^n P_i \times W_i \quad (1)$$

式中: E_1 为生活用水效益,万元; P_i 为各行政区域生活用水价格,元/ m^3 ; W_i 为分配给生活用水的水量,万 m^3 , n 为该地区的行政区域个数。

4.2. 工业用水效益计算

本论文提出计算供水分摊系数的一种新方法——用生态经济学的能值分析方法计算效益分摊系数,即将工业生产系统中不同种类、不可比较的物质、能量、货币转换成同一度量标准的能值来核算工业生产系统的投入和产出,通过计算供水投入总能值与生产系统投入总能值的比值得出效益分摊系数,并结合各项

能值指标分析供水效益。由于供水能值不仅包括水利工程投资和固定资产, 还包括了水资源本身的资产投入, 因此, 以此方法计算所得效益分摊系数能较客观、真实反映生产过程的全部要素, 有利于分析评价城市雨洪资源利用的真实效益。

4.2.1. 能值法原理

能值(Energy)分析理论是美国著名生态学家、系统能量分析先驱 H.T.Odum 为首于 20 世纪 80 年代创立的。能值分析就是把生态经济系统中不同种类的能量转换成同一基准的能值, 来分析和衡量系统内部的能量运动特征, 为生态系统和生态经济系统的定量分析研究开拓了新途径。能值分析通过能值转换率将生态经济系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一度量标准的能值来衡量和分析, 从宏观角度将自然环境生产与人类经济活动进行统一评价, 定量分析整个生态经济系统的结构功能与效益, 提供了衡量自然资源对经济发展真实贡献的标准。

4.2.2. 能值法计算工业用水效益步骤

能值法计算工业供水效益分摊系数是以工业生产系统能值分析为基础, 研究工业系统生产过程投入以及产出的能值流, 将系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一度量标准的能值来衡量, 综合分析系统的能量流、物质流与货币流动态过程及其相互关系, 求得一系列反映生态与经济性能的能值综合指标, 并加以汇总分析^[6,7]。具体步骤包括: 系统能值图的绘制、能值分析表的建立、分摊系数的计算。

1) 绘制工业生产系统能值图

工业生产系统的能值图以 Odum“能量系统语言”即能值符号为基础, 通过能值符号, 把生态经济系统的各部分联结起来, 并用简便的图解方法描绘整个系统的结构图, 它明确了系统的基本结构、系统内外的相互关系和主要生态流的方向, 表现了工业生产系统环境与经济主要成分的相互关系与能量流、物质流等相互作用^[8]。主要步骤包括: 界定工业生产系统范围的边界、列出系统的主要能量来源、确定系统内的主要成分并列各主要成分的过程和关系、以能值符号绘制能值图。

2) 建立工业生产系统能值分析表

建立能值分析表是为了将收集到的有关研究对

象的不同度量单位(J、g 或 m³)的生态流或经济流数据资料转换为能值单位(sej)统一衡量与分析, 以便进行能值计算。能值计算采用以下公式:

$$EM = \tau \times B \quad (2)$$

式中: EM 为能值(sej); τ 为能值转换率(sej/J 或 sej/g); B 为能量或物质的质量(J 或 g)。能值分析表一般包括项目名称、原始数据、太阳能值转换率、太阳能值四项。其中太阳能值(即原始数据与太阳能值转换率的乘积), 将各类物质统一换算成太阳能值, 从而有了分析比较的基础。能值分析将工业生产系统的能、物流与价值流在太阳能值基础上有机结合起来, 概念清晰、方法简便, 弥补传统算法的缺陷。

3) 计算效益分摊系数

在能值分析表的基础上汇总工业生产系统的能值投入和产出, 建立农作物生产系统投入产出表, 最后计算工业供水效益分摊系数及供水效益, 表达式如下:

$$\alpha_1 = \frac{En_{gs}}{En_i} \quad (3)$$

$$E_2 = \alpha_1 \times En_c \quad (4)$$

式中: E_2 为工业用水效益, 万元; α_1 为工业供水效益分摊系数; En_{gs} 为工业总供水能值, 用工业总供水量乘以相应的能值转换率计算得到; En_i 为工业系统投入总能值, 包括可更新能源和不可更新能源的投入能值; En_c 为工业系统产出总能值。

工业总供水包括了水利工程投资、固定资产及水资源本身的资产投入; 工业系统投入包括了生产所需的能源、原材料、经营费用、固定资产及劳务的投入; 工业系统产出包括了生产系统的全部产品。

4.3. 农业用水效益计算

本文提出计算灌溉效益分摊系数的一种新方法——用生态经济学的能值分析方法计算农业灌溉效益分摊系数, 即将农作物生产系统中不同种类、不可比较的物质、能量、货币转换成同一度量标准的能值来核算农业生产系统的投入和产出, 通过计算灌溉投入总能值与农作物生产系统投入总能值的比值得出农业灌溉效益分摊系数, 结合各项能值指标分析农业灌溉效益^[9]。

在农作物生产系统能值分析的基础上, 计算生产过程中的农业灌溉总能值投入量和生产过程总能值投入量, 并且定义两者之比为灌溉效益分摊系数, 具体步骤包括: 系统能值图的绘制、能值分析表的建立、分摊系数的计算以及灌溉能值指标体系的建立。在能值分析表的基础上汇总农作物生产系统的能值投入和产出, 包括农业生产系统投入总能值、农作物能值等, 并建立农作物生产系统投入产出表, 最后计算农业灌溉效益分摊系数及灌溉效益, 计算表达式如下:

$$\alpha_2 = \frac{En_{gg}}{En_{nt}} \quad (5)$$

$$E_3 = \alpha_2 \times En_{nc} \quad (6)$$

式中: E_3 为农业用水效益, 万元; α_2 为农业灌溉效益分摊系数; En_{gg} 为农业灌溉投入总能值, 用农业灌溉总供水量乘以相应的能值转换率计算得到; En_{nt} 为农作物生产系统投入总能值; En_{nc} 为农作物生产系统产出总能值。

4.4. 生态环境用水效益计算

理论上, 生态系统获得配水后, 生态系统结构和功能发生变化, 生态系统服务的价值增加, 这部分增加的价值并不完全是生态配水带来的, 也即生态系统的耗水来源于生态配水和有效降雨^[10-12], 因此生态环境用水效益分摊系数 e 公式为

$$e = \frac{WER}{WER + P_0} \quad (7)$$

式中: WER 为实际的不包括降雨的生态耗水(mm); P_0 为有效降雨量(mm)。

设 $SVESR$ 为静态生态价值, WER 为现状实际的生态耗水, 生态环境用水的动态生态价值 $DVES$ 为

$$DVES = WE \cdot l \cdot r \cdot \frac{SVESR}{WER} \quad (8)$$

式中: l 、 r 分别为社会发展阶段系数及资源紧缺度; WE 为生态环境用水量。

生态环境用水的生态效益为动态生态价值与生态效益分摊系数之积:

$$E_4 = e \cdot DVES \quad (9)$$

式中: E_4 为生态系统的生态效益; e 为生态用水为 WE 时相应生态系统的生态效益系数。

5. 实例研究

江苏省连云港市地处淮河流域沂沭泗河水系的最下游, 流域主要洪水入海通道新沂河、新沭河经连云港市入海, 连云港市承担上游近 8 万 km^2 流域面积的泄洪任务, 是著名的“洪水走廊”。过境水量丰沛, 对连云港市雨洪资源合理利用, 可以提高连云港市水资源的可持续利用程度, 更好服务于未来社会经济发展。已知连云港市多年平均雨洪资源可利用量为 6.61 亿 m^3 , 将连云港市多年平均雨洪资源可利用总量进一步按照生活、农业、工业和生态环境用水进行分配, 见表 1。

根据连云港市自来水有限责任公司水价收费标准, 连云港各区县自来水水价和各行政区水量分配比例, 可计算得连云港市生活用水效益见表 2。

生活用水效益为各行政区域效益之和, 计算得到生活用水效益为 2.094 亿元。

根据连云港市工业生产系统能值流计算结果, 计算供水效益分摊系数, 具体计算过程及结果见表 3。

由表 3 中数据可以看出, 连云港市工业供水总效益为 16.88 亿元。灌溉效益分摊系数计算见表 4。

Table 1. Available resources of rainfall flood in Lianyungang
表 1. 连云港市雨洪资源可利用量分配情况

| 用水类别 | 市区 | | 赣榆县 | | 东海县 | | 灌云县 | | 灌南县 | | 总计 | 比例 (%) |
|------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|---------|--------|
| | 分配量 (万 m^3) | 比例 (%) | 分配量 (万 m^3) | 比例 (%) | 分配量 (万 m^3) | 比例 (%) | 分配量 (万 m^3) | 比例 (%) | 分配量 (万 m^3) | 比例 (%) | | |
| 生活 | 3929.4 | 26.9 | 1797.2 | 10.9 | 1281.8 | 5.6 | 966.9 | 8 | 4.5 | 6.8 | 7979.9 | 12.1 |
| 工业 | 5098.0 | 34.9 | 3000.8 | 18.2 | 1762.5 | 7.7 | 1051.5 | 8.7 | 6.4 | 9.6 | 10919.2 | 16.5 |
| 农业 | 5419.3 | 37.1 | 11591.1 | 70.3 | 19250.5 | 84.1 | 9343.0 | 77.3 | 52.3 | 78.4 | 45656.1 | 69.0 |
| 生态 | 160.7 | 1.1 | 98.9 | 0.6 | 595.1 | 2.6 | 725.2 | 6 | 3.5 | 5.2 | 1583.4 | 2.4 |
| 总计 | 14,607 | 100 | 16,488 | 100 | 22,890 | 100 | 12,087 | 100 | 67 | 100 | 66,139 | 100 |

Table 2. Domestic water efficiency of each counties in Lianyungang
表 2. 连云港各区县生活用水效益

| 行政区 | 市区 | 赣榆县 | 东海县 | 灌云县 | 灌南县 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 水价(元/m ³) | 2.76 | 2.50 | 2.52 | 1.60 | 2.50 |
| 生活用水效益(亿元) | 1.167 | 0.448 | 0.322 | 0.155 | 0.002 |

Table 3. Industry water efficiency apportionment coefficient results of Lianyungang
表 3. 连云港市工业供水效益分摊系数计算结果

| 项目 | 符号或公式 | 数值 |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 工业供水量(m ³) | W | 1.1×10^8 |
| 工业供水能值(sej) | EM_{IW} | 8.39×10^{20} |
| 效益分摊系数(%) | $\varepsilon = EM_{IW}/EM_{IT}$ | 1.45 |
| 工业供水总效益(sej) | $S = \varepsilon \times EM_{IT}$ | 1.26×10^{21} |
| 能值货币比率(sej/元) | EM_P | 7.44×10^{11} |
| 工业供水总效益(亿元) | $M = S/EM_P$ | 16.88 |
| 单方水供水效益(元/m ³) | $S_1 = M/W$ | 15.4 |

Table 4. Irrigation efficiency apportionment coefficient calculation result
表 4. 连云港市农业灌溉效益分摊系数计算结果

| 项目 | 符号或公式 | 数值 |
|--------------------------|--|------------------------|
| 农业灌溉用水量(m ³) | W | 4.57×10^8 |
| 农业灌溉用水能值 | EM_{AW1} | 7.51×10^{20} |
| 农业灌溉投入总能值(sej) | 农业灌溉设施投入能值 EM_{AW2} | 0.19×10^{20} |
| | 小计 EM_{AW} | 7.7×10^{20} |
| 总投入能值(sej) | EM_{AT} | 59.89×10^{20} |
| 农作物能值 | EM_{AY} | 14.6×10^{20} |
| 灌溉效益分摊系数(%) | $\varepsilon = EM_{AW}/EM_{AT}$ | 12.8 |
| 农业灌溉总效益(sej) | $EM_{AW} = \varepsilon \times EM_{AT}$ | 1.88×10^{20} |
| 能值货币比率(sej/元) | EM_{AP} | 7.44×10^{11} |
| 农业灌溉效益(元) | $M = EM_{AW}/EM_{AP}$ | 2.52×10^8 |
| 单方水效益(元/m ³) | $S_1 = M/W$ | 0.55 |

由表 4 中数据可以看出, 连云港市农业用水总效益为 2.52 亿元。

实际的不包括降雨的生态耗水 WER 由资料查得: $WER = 444 \text{ mm}$, 对应的年均耗水量为 1.31 亿 m³, 则 $e = 0.898$ 。通过计算得到连云港市生态环境用水效益为 1.99 亿元。

由以上结果可得, 连云港市雨洪资源利用多年平均效益以及单方水效益, 分别见表 5 和表 6。

因此, 连云港市雨洪资源利用多年平均效益为 23.48 亿元。工业用水多年平均效益为 16.88 亿元。连云港市工业系统产出中, 发电量、食品饮料加工制造及设备制造这几项能值产出最大, 所产生的效益也最

大。农业用水效益较小, 为 2.52 亿元, 相对于工业用水来说, 其能值产出较低, 所以农业用水效益较低, 又因其用水投入量较大, 从而导致了单方水效益很小。

6. 结论

本文分析了国内外雨洪资源利用效益研究进展, 针对沿海地区城市雨洪资源利用效益问题, 将雨洪资源可利用总量按照生活、农业、工业和生态用水进行分配, 确定各类用水的分配系数, 分别计算各项用水效益。生活用水效益采用用水水价法计算; 工业、农业用水效益采用能值分析方法计算效益分摊系数,

Table 5. Multi-year average benefit of Lianyungang rainfall flood resources (Unit: 100 million Yuan)
表 5. 连云港市雨洪资源利用多年平均效益 (单位: 亿元)

| 生活用水效益 | 工业用水效益 | 农业用水效益 | 生态环境用水效益 | 总效益 |
|--------|--------|--------|----------|-------|
| 2.094 | 16.88 | 2.52 | 1.99 | 23.48 |

Table 6. Multi-year average benefit of Lianyungang rainfall flood resources (per cubic meter water) (Unit: Yuan/m³)
表 6. 连云港市雨洪资源利用多年平均效益(单方水)(单位: 元/m³)

| 生活用水效益 | 工业用水效益 | 农业用水效益 | 生态环境用水效益 |
|--------|--------|--------|----------|
| 2.62 | 15.4 | 0.55 | 12.52 |

采用供水分摊系数与工业、农业系统产出总能值计算效益, 生态环境用水效益采用生态环境用水效益分摊系数法计算, 为我国平原地区雨洪资源利用效益分析研究提供了新思路。当然, 本文在计算生活用水效益时, 简单将城市居民用水平均价格与城市居民生活用水量之积视为生活用水效益, 没有考虑水资源的影子价格等因素, 有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] TAKAHASI, Y., UITTO, J. I. Evolution of river management in Japan: From focus on economic benefits to a comprehensive view. *Global Environmental Change*, 2004, 14: 63-70.
- [2] HATIBU, N., MUTABAZI, K. and SENKONDO, E. M. Economics of rainwater harvesting for crop enterprises in semi-arid areas of East Africa. *Agricultural Water Management*, 2006, 80 (1-3): 74-86.
- [3] 于琪洋. 加强城市雨洪资源利用保障城市可持续发展[J]. *水利发展研究*, 2002, 2(3): 12-14.
YU Qiyang. Strengthen city rain flood resources utilization to ensure sustainable development of city. *Water Resources Development Research*, 2002, 2(3): 12-14. (in Chinese)
- [4] 邵东国, 李玮, 刘丙军, 等. 抬高水库汛限水位的洪水资源化利用研究[J]. *中国农村水利水电*, 2004, 9: 26-29.
SHAO Dongguo, LI Wei, LIU Bingjun, et al. Study on flood-water resources utilization by raising up the flood control level. *China Rural Water and Hydropower*, 2004, 9: 26-29. (in Chinese)
- [5] 鹿新高, 庞清江, 邓爱丽, 等. 城市雨水资源化潜力及效益分析与利用模式探讨[J]. *水利经济*, 2010, 1: 1-4.
LU Xingao, PANG Qingjiang, DENG Aili, et al. Potential, benefit analysis and utilization mode of urban rainwater resources. *Journal of Economics of Water Resources*, 2010, 1: 1-4. (in Chinese)
- [6] ODUM, H. T., ODUM, E. C. Energy use, environment loading and sustainability: An energy analysis of Italy. *Ecological Modelling*, 1994, 73(3-4): 215-268.
- [7] 吴泽宁, 吕翠美. 能值法计算工业供水效益分摊系数[J]. *节水灌溉*, 2009, 6: 12-15.
WU Zening, LV Cuimei. Calculation of benefit sharing coefficient of industrial water supply using energy method. *Water Saving Irrigation*, 2009, 6: 12-15. (in Chinese)
- [8] ODUM, H. T. *Environmental accounting: Energy and environmental decision making*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [9] 刘继展, 李萍萍. 江苏农业生态系统能值分析[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2005, 1: 29-36.
LIU Jizhan, LI Pingping. Energy analysis for agroecosystem of Jiangsu Province. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2005, 1: 29-36. (in Chinese)
- [10] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
LAN Shengfang, QIN Pei and LU Hongfang. Energy analysis of the ecological economic. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [11] 粟晓玲, 康绍忠, 佟玲. 内陆河流域生态系统服务价值的动态估算方法与应用——以甘肃河西走廊石羊河流域为例[J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 2011-2019.
SU Xiaoling, KANG Shaozhong and TONG Ling. A dynamic evaluation method and its application for the ecosystem service value of an inland river basin: A case study on the Shiyanghe River Basin in Hexi Corridor of Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 2011-2019. (in Chinese)
- [12] 彭建, 王仰麟, 陈燕飞, 等. 城市生态系统服务功能价值评估初探——以深圳市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(4): 594-604.
PENG Jian, WANG Yanglin, CHEN Yanfei, et al. Economic value of urban ecosystem services: A case study in Shenzhen. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2005, 41(4): 594-604. (in Chinese)