



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.002

吴泽宁, 田桂桂, 王慧亮. 基于物质循环的河道内生态用水价值及其能值评估[J]. 2016, 14(2): 06-10.

WU Ze ning, TIAN Gui gui, WANG Hui liang. Value of instream ecological water use and the energy evaluation method based on material cycle[J]. 2016, 14(2): 06-10. (in Chinese)

# 基于物质循环的河道内生态用水价值及其能值评估

吴泽宁, 田桂桂, 王慧亮

(郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001)

**摘要:** 水生生态系统的生态服务价值主要是伴随着水循环、碳循环、氮循环的过程而实现的。水循环伴随的生态服务价值包括调节气候价值、输送价值、水体自净价值;碳循环伴随的生态服务价值包括净初级生产力、生物量;氮循环伴随的生态服务价值包括生物多样性保护价值、水污染损失。针对河道内生态用水不同组分量纲不同,采用能值统一度量水生生态系统生态服务价值,以郑州市水生生态系统为研究对象,计算其2011年生态服务价值为 $3.16 \times 10^{20}$  sej,各项服务价值从大到小顺序依次为:输送价值> 调节气候> 净初级生产力> 生物多样性保护> 生物量> 水体自净> 水污染损失,分析其优势和薄弱环节。研究成果可为水生态修复提供决策依据。

**关键词:** 物质循环;水生生态系统;生态服务;生态用水价值;能值评估

**中图分类号:** P339; X826    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0006-05

## Value of instream ecological water use and the energy evaluation method based on material cycle

WU Ze ning, TIAN Gui gui, WANG Hui liang

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** As value of ecological water use is reflected by material cycle and energy flow in aquatic ecosystem, ecosystem services value is discussed from the aspects of water cycle, carbon cycle, and nitrogen cycle. Ecosystem services value associated water cycle includes climate regulation value, delivery value and water self purification. Ecosystem services value associated carbon cycle includes net primary productivity and biomass. Ecosystem services value associated nitrogen cycle includes biodiversity protection and water pollution loss. According to the dimensional difference of component parts for ecological water use, energy method was used to evaluate ecosystem services value. Taking Zhengzhou as a case study: its ecological value in 2011 was  $3.16 \times 10^{20}$  sej, and the value from the great to the little was delivery value, climate regulation value, net primary productivity, biodiversity protection, biomass, water self purification, and water pollution loss. At last, the advantages and disadvantages were discussed, and decision making basis was provided for water ecological recovery.

**Key words:** material cycle; aquatic ecosystem; ecosystem services; value of ecological water use; energy evaluation

生态用水是指在一定来水条件下,为维持生态系统特定结构、生态过程和生态系统服务功能,在天然生态保护和人工生态建设过程中所用的水量<sup>[1]</sup>。足够的水量和良好的水质是维持生态系统正常运行

的基础和保障<sup>[2]</sup>。然而,在水资源的开发利用中,人类对水资源保护与生态环境的相互依存的关系缺乏认识,忽视生态用水<sup>[3]</sup>,出现了生产、生活用水挤占生态用水的不良状态,导致了水环境恶化和生态系

收稿日期: 2015-07-29    修回日期: 2015-09-09    网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1454.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379191); 国家博士面上基金项目(2015M572116); 河南省博士基金项目(2014012)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51379191); National Postdoctoral Science Foundation Funded Project(2015M572116); Dr. Foundation Funded Project in Henan Province(2014012)

作者简介: 吴泽宁(1963-),男,河南光山人,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zeningu@zzu.edu.cn

统功能衰退<sup>[46]</sup>等一系列的生态环境问题。生态文明建设要求在水资源的开发利用中,不能只顾经济利益而忽略对生态用水的要求,应当把生态用水放在重要位置。

河道内生态用水是天然水循环运动空间内生态环境要素对水资源的消耗<sup>[7]</sup>,它的研究主体是水生生态系统。生态用水价值是伴随着水生生态系统内部物质循环体现出来的,研究河道内生态用水价值即分析水生生态系统内部物质循环伴随的生态服务价值。目前,很多学者对水生生态系统生态服务价值进行了研究<sup>[8-10]</sup>,但多是针对宏观层面,尚缺乏从物质循环的角度对其进行细化分析。本文拟从水生生态系统内部物质循环和能量流动的机理出发,探索河道内生态用水价值组成及表现形式,并采用能值方法对其进行定量评价,为天然河道的治理和改造提供决策依据。

## 1 水生生态系统物质循环伴随的生态服务价值

水生生态系统是指在一定空间范围内,由水生生物与其水环境所组成的,通过物质流、能量流、信息流和价值流而形成的稳定系统。水生生态系统服务功能是指水生生态系统及其生态过程所形成的维持人类赖以生存的自然环境条件与效用<sup>[11]</sup>,它是伴随系统内部的物质循环而产生的。在水生生态系统中,碳循环、氮循环和水循环是其能量传输、养分循环和水分运移最主要的载体<sup>[12]</sup>。因此,从物质循环和能量流动的角度来看,水生生态系统的生态服务价值主要是伴随着水循环、碳循环、氮循环的过程而实现的。水循环、碳循环、氮循环相互作用、相互耦合,共同维持水生生态系统的功能。下面从水元素、碳元素、氮元素流动、迁移和转化的角度,分析水生生态系统的生态服务价值的组成及表现形式。

### 1.1 水循环过程的生态服务价值

水循环是水生生态系统中其他物质迁移和转化的动力和载体,任何一种物质循环都离不开水循环的推动作用,没有水循环,就没有其他物质循环,就没有生态系统功能。水循环所伴随的生态服务价值体现在水循环的各个环节。

#### 1.1.1 调节气候价值

蒸发是水循环中的重要环节之一,在维持区域水量平衡和热量平衡中起重要作用<sup>[13]</sup>。地球温度上升主要是由热辐射和感热引起的,蒸发可以减少热辐射和感热以降低地表温度。太阳辐射有 1 724

$W \cdot h / (m^2 \cdot d)$  形成热辐射,形成的地表净辐射有  $2 462 W \cdot h / (m^2 \cdot d)$ ,其中有  $575 W \cdot h / (m^2 \cdot d)$  形成感热,其余的  $1887 W \cdot h / (m^2 \cdot d)$  由蒸发作用消耗形成潜热<sup>[14]</sup>。潜热是指水分从液体变成气体会吸收热量。如果蒸发减少则潜热就会有一部分转化为感热,致使气温上升,反之则气温下降。因此,水循环过程的蒸发环节体现了水生生态系统的气候调节价值。

#### 1.1.2 输送价值

在径流环节中,河水不仅通过流动冲刷河床上的泥沙,疏通河道,而且能携带和输送大量的营养物质,这对维系水生生态系统高生产力起着关键作用<sup>[15]</sup>。因此,水循环过程的径流环节体现了水生生态系统的输送价值。

#### 1.1.3 水体自净价值

在水循环中,水与各种物质接触,使它们混入或溶入其中,从而改变水体特性。水体污染可以发生在水循环的各个环节上,如降雨过程中的酸雨、农田径流进入湖泊导致的富营养化等。但是水中污染物也会随水体的运动不断发生变化,自然减少、消失或无害化,从而体现了水生生态系统的水体自净价值。

### 1.2 碳循环过程的生态服务价值

水生植物通过吸收空气中或溶解在水中的  $CO_2$  进行光合作用,制造有机物,并释放  $O_2$ ,维持大气气体构成比例的稳定。同时,水生植物、动物和微生物通过呼吸作用将固定在光合产物中的有机碳释放到大气圈和水圈的碳分室中。植物的水分供需平衡影响着碳循环的强度,而碳循环为生态系统提供动力,带动其它物质进入或离开生物圈,转化为生物体的有机成分或环境的无机成分<sup>[16]</sup>。碳循环决定了水生生态系统水资源的生态生产力,其所伴随的水生态系统服务价值主要体现在净初级生产力和生物量上。

#### 1.2.1 净初级生产力(NPP)

净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指单位时间内生物(主要指绿色植物)通过光合作途径所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分,用于自身的生长和生殖的有机碳量,通常以每年每平方米合成的有机干物质克数( $g / (m^2 \cdot a)$ )表示。

#### 1.2.2 生物量(B)

生物量(Biomass, B)是指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质总量,通常用  $kg / m^2$  表示。B 是表征生态系统生产力和功能高低的重要指标。

### 1.3 氮循环过程的生态服务价值

氮素是提高水生生态系统生产能力的主要限制因子,氮循环对维持水生生态系统功能具有重要作

用。生态系统的氮素代谢过程贯穿于碳-水耦合循环之中<sup>[17]</sup>,水循环为氮循环提供载体,碳循环为氮循环提供动力。总体来看,氮循环所伴随的水生生态系统生态服务价值主要体现在以下两个方面:

### 1.3.1 生物多样性保护价值

水生植物必须通过生物固氮作用才能吸收和利用氮素,水生动物直接或间接地以植物为食物来获取氮素。动物体排泄产生的尿素,以及动植物遗体中的含氮废物,被微生物分解后形成氨。硝化细菌将氨转化成硝酸盐,硝酸盐可以再次被植物吸收利用。周而复始的氮循环,保证了水生动植物的生存和繁衍,维持了物种的多样性。

### 1.3.2 水污染损失

含有尿素、氨氮的生活污水排入水体后会使得正常的氮循环变成“短路循环”<sup>[18]</sup>,可以造成水体富营养化,使得水生生态系统生物多样性下降、水体自净功能降低,造成水体污染,破坏水生生态平衡。因此,氮的“短路循环”诱发了水污染损失。

## 2 水生生态系统生态服务价值能值评估方法

由水生生态系统物质循环伴随的生态服务价值分析看出,在物质循环的不同环节体现出生态服务价值的表现形式和量纲各异,传统评估方法难以实现对其进行统一量化评估。针对物质循环伴随的生态服务价值各组分及其表现形式,本文拟运用能值定量分析技术,对河道内生态用水价值进行统一度量 and 评估。能值理论是由美国著名生态学家 Odum 提出的新科学理论体系<sup>[19]</sup>。能值分析方法以能量为核心、以能值为基准,可以使生态系统中原本难以统一度量的能流、物流等生态经济流转换成统一的能值单位,从而进行比较和分析<sup>[20]</sup>。能值分析方法的步骤包括:(1)绘制系统能量图;(2)系统能值流计算;(3)能值指标计算;(4)编制能值分析表。水生生态系统生态服务价值能值评估方法的重点在于不同价值指标的能值表述。

根据上述水循环、碳循环、氮循环的机理分析,运用能值对水生生态系统生态服务价值进行表述。

### 2.1 调节气候价值

水体蒸发能值的大小反映了水生生态系统的气候调节能力。调节气候价值的计算公式<sup>[21]</sup>如下:

$$\begin{aligned} L &= 2507.4 - 2.397T \\ E &= L \times G \\ EM_q &= E \times \tau_q \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $EM_q$  为调节气候价值(sej); $L$  为蒸发潜热(J/

g); $T$  为计算区域平均气温(°C); $E$  为水体蒸发能量(J); $G$  为蒸发量(g); $\tau_q$  为蒸汽能值转换率(sej/J)。

### 2.2 输送价值

河川径流量能值的大小反映了河流的输送功能。输送价值的计算公式如下:

$$EM_t = R \times \tau \quad (2)$$

式中: $EM_t$  为输送价值(sej); $R$  为河川径流量( $m^3$ ); $\tau$  为天然河道水体的能值转换率(sej/ $m^3$ )。

### 2.3 水体自净价值

水体自净能力是指水中污染物浓度自然降低而恢复到较清洁的能力。从能值角度,水体对污染物的消减量能值即为水体自净价值,计算公式如下:

$$EM_j = M_i \times \tau_i \quad (3)$$

式中: $EM_j$  为水体自净价值(sej); $\tau_i$  为污染物*i*的能值转换率(sej/g); $M_i$  为水体对污染物*i*的消减量(g)。

### 2.4 净初级生产力(NPP)和生物量(B)

表 1 为全球各种水生生态系统的单位面积净初级生产力(NPP)和生物量(B),NPP 和 B 的能值转换率分别为  $\tau_{NPP} = 5.78 \times 10^7$  sej/g,  $\tau_B = 5.11 \times 10^6$  sej/g<sup>[22]</sup>。计算中需收集研究区域不同类型水域的面积。

表 1 水生生态系统净初级生产力、生物量情况<sup>[22]</sup>

Tab. 1 NPP and B of aquatic ecosystems

水生生态系统	初级生产力/( $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ )	生物量/( $10^3 g \cdot m^{-2}$ )
沼泽和湿地	2 500.00	15.00
湖泊和河流	500.00	0.02
河口	1 800.00	1.00
远洋	127.00	1.00
海洋	153.00	0.93
全球	320.00	3.62

### 2.5 生物多样性保护价值

水生生态系统的生物多样性保护价值计算公式<sup>[21]</sup>如下:

$$EM_s = \tau_s \times N \times R \quad (4)$$

式中: $EM_s$  为生物多样性保护价值(sej); $R$  为生物活动面积占全球面积( $5.21 \times 10^{14} m^2$ )的比例(%); $\tau_s$  为物种能值转换率(sej/种); $N$  为计算区域内水生生物物种总数(种)。

### 2.6 水污染损失

当水中污染物浓度大于水功能区纳污能力时,说明水质恶化,水体丧失水环境保护所要求的功能,称之为水污染。计算时,将水体污染物浓度与水功能区纳污能力进行对比,二者差值为污染物超标量,具体计算公式如下:

$$EM_p = S_i \times \tau_i \quad (5)$$

式中:  $EM_p$  为水污染负效益(sej);  $S_i$  为污染物  $i$  的超标量(g);  $\tau_i$  为污染物  $i$  的能值转换率(sej/g)。

### 3 实例应用

#### 3.1 研究区域概况

郑州位于河南省中部偏北,气候属北温带季风型气候,年平均气温 14.4℃,年平均降雨量 640.9 mm,全年日照时数约 2 400 h。境内大小河流 35 条,其中黄河流经郑州段 150.4 km。近些年,随着城市化进程的加快,郑州市水环境问题日益显著,出现了水质污染严重、水生态系统功能退化等一系列生态环境问题。

#### 3.2 郑州市河道内生态用水价值能值评估

##### 3.2.1 郑州市水生生态系统能量系统

郑州市 2011 年水生生态系统能量系统见图 1。系统的主要能量来源是太阳能、风、雨水等可更新环境资源,称之为系统驱动力;不可再生能源是底泥、水体;初级生产者是水生植物、藻类、湿地植被等;消费者是水生动物;水生态系统的产出项是生态环境价值。

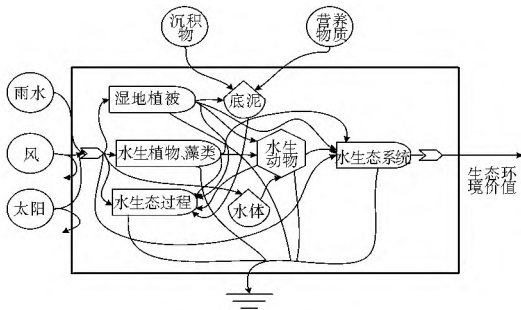


图 1 郑州市水生生态系统能量系统

Fig. 1 Energy system diagram of aquatic ecosystems in Zhengzhou

##### 3.2.2 编制能值分析表

首先,收集郑州市 2011 年水生生态系统的原始资料数据,数据来源于 2011 年《郑州市水资源公报》、《郑州市环境质量状况公报》、《郑州市生态水系规划》。然后,根据公式(1) - (5) 进行能值指标计算。最后,分类汇总并编制能值分析表。计算结果见表 2。

从表 2 中可以得到以下结论:

(1) 2011 年郑州市水生生态系统的驱动力为  $3.72 \times 10^{19}$  sej,水生生态系统的生态服务价值为  $3.16 \times 10^{20}$  sej。

(2) 分别比较水循环、碳循环、氮循环所伴随的生态服务价值发现:水循环伴随的生态服务价值明显高于碳循环和氮循环,这说明水循环决定着水生生态系统生态服务功能的强弱,是其他一切物质循环的基础。

表 2 郑州市 2011 年河道内生态用水价值能值分析

Tab. 2 Energy analysis table of ecological value of instream water in Zhengzhou in 2011

序号	项目	原始数据	太阳能值转换率	太阳能值(sej)
1	太阳辐射	$3.63 \times 10^{19}$ J	1 sej/J	$3.630 \times 10^{16}$
2	风	$6.29 \times 10^{16}$ J	$6.23 \times 10^2$ sej/J	$39.19 \times 10^{16}$
3	雨水化学能	$2.65 \times 10^{16}$ J	$1.54 \times 10^4$ sej/J	$4.08 \times 10^{16}$
4	雨水势能	$5.26 \times 10^{16}$ J	$8.89 \times 10^3$ sej/J	$46.76 \times 10^{16}$
5	地球旋转	$0.74 \times 10^{16}$ J	$2.90 \times 10^4$ sej/J	$2.15 \times 10^{16}$
小计	驱动力			$3.722.18 \times 10^{16}$
6	水分蒸发潜热(调节气候)	$1.15 \times 10^{19}$ J	12.20 sej/J	$14.03 \times 10^{19}$
7	河川径流量(输送价值)	$4.16 \times 10^{15}$ J	$4.10 \times 10^4$ sej/J	$17.06 \times 10^{19}$
8	氨氮消减量(水体自净)	$4.015 \times 10^5$ g	$2.80 \times 10^9$ sej/g	$11.24 \times 10^{15}$
9	NPP(净初级生产力)	$4.02 \times 10^{10}$ g	$5.78 \times 10^7$ sej/g	$2.32 \times 10^{18}$
10	B(生物量)	$19.5 \times 10^{10}$ g	$5.11 \times 10^6$ sej/g	$9.66 \times 10^{17}$
11	水生生物种类(生物多样性保护)	325 种	$7.05 \times 10^5$ sej/种	$2.29 \times 10^{18}$
12	氨氮超标量(水污染)	$0.9125 \times 10^5$ g	$2.80 \times 10^9$ sej/g	$-2.56 \times 10^{14}$
小计	生态服务价值			$3.16 \times 10^{20}$

##### 3.2.3 各项服务价值由大到小顺序

依次为输送价值> 调节气候> 净初级生产力> 生物多样性保护> 生物量> 水体自净> 水污染损失。针对其薄弱环节,可以提出相应的改善措施,如:可以通过湿地植被建设、水生动物投放、水生植物栽培等措施增加净初级生产力、生物量和生物多样性保护价值;严格落实“三条红线、四项制度”,控制入河湖排污总量,可以减少水污染损失,增加水体自净价值。

### 4 结语

本文从水生生态系统内部水循环、碳循环、氮循环的角度出发分析了河道内生态用水价值,构建了河道内生态用水价值能值评估方法。通过细化分析和评价不同物质循环所伴随的生态服务价值,可以从系统结构、物质组成的角度评价水生生态系统的功能状况,了解系统的优势和薄弱环节,结合区域的发展情况为水系规划提出具体详细的科学建议。由于资料不足,水污染和水体自净价值的计算过程中没有考虑 COD 超标量(消减量),实例应用中尚缺乏年际之间的比较和分析。此外,基于二元水循环

的河道外生态用水价值能值评估方法将是本课题今后研究的重点。

#### 参考文献(References):

- [1] 王瑞莲. 生态用水及用水水平评价探讨[D]. 南京: 河海大学, 2005. (WANG Rui lian. Research on the Ecological Water Utilization & the Assessment of Water Utilization Level[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [2] 管新建, 齐雪艳, 吴泽宁, 等. 东居延海生态系统服务功能价值的能值分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 253-256. (GUAN Xin jian, QI Xue yan, WU Ze ning, et al. Analysis on energy value of service function of east Juyan Lake wetland ecosystem[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 253-256. (in Chinese))
- [3] 尹新明, 张家兴. 基于人类活动影响下衡水湖湿地生态用水安全分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 104-109. (YIN Xin ming, ZHANG Ji xing. The wetland ecological water safety analysis of the Hengshui Lake based on the influence of human activities[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 104-109. (in Chinese))
- [4] 张建云, 王小军. 关于水生态文明建设的认识和思考[J]. 中国水利, 2014(7): 14. (ZHANG Jian yun, WANG Xiao jun. Issues Related to Building of Water Ecological Civilization[J]. China Water Resources, 2014(7): 14. (in Chinese))
- [5] 康爱卿, 刘鸽, 李兆东, 等. 五家渠市生态用水安全形势[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 89-93. (KANG Ai qing, LIU Ge, LI Zhao dong, et al. Research on the Situation of Ecological Water Security in Wujiaqu City[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 89-93. (in Chinese))
- [6] 沈茂成. 保障生态用水保护湿地资源[J]. 中国林业, 2001(7): 16-17. (SHEN Mao cheng. The protection of ecological water and wetland resources[J]. Chinese Forestry, 2001(7): 16-17. (in Chinese))
- [7] 徐扬民. 鄱阳湖区生态用水及水资源优化配置研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2005. (XU Yang min. Research on ecological water resources optimization allocation in Poyang Lake Area[D]. Nanchang: Nanchang University, 2005. (in Chinese))
- [8] 杨美玲, 马鹏燕. 银川市水生态系统服务功能价值评价[J]. 中国农学通报, 2011, 27(26): 239-244. (YANG Mei ling, MA Peng yan. Service function analysis and value evaluation of aquatic ecosystem in Yinchuan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(26): 239-244. (in Chinese))
- [9] 叶延琼, 章家恩, 陈丽丽, 等. 广州市水生态系统服务价值[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1303-1310. (YE Yan qiong, ZHANG Ji en, CHEN Li li, et al. Value evaluation of aquatic ecosystem services in Guangzhou, South China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1303-1310. (in Chinese))
- [10] 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 等. 青海湖湖泊水生态系统服务功能的使用价值评估[J]. 生态经济, 2013(9): 163-167. (CAO Sheng kui, CAO Guang chao, CHEN Ke long, et al. Evaluation of use value of water ecosystem service functions in the Qinghai Lake[J]. Ecological Economy, 2013(9): 163-167. (in Chinese))
- [11] Yong R A, Gray S L. Economic Value of Water: Concepts and Empirical Estimates[R]. National Water Commission Report. 1972.
- [12] 于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 等. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 1-13. (YU Gui ru, GAO Yang, WANG Qiu feng, et al. Discussion on the key processes of carbon nitrogen water coupling cycles and biological regulation mechanisms in terrestrial ecosystem[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2013, 21(1): 1-13. (in Chinese))
- [13] 左其亭, 窦明, 吴泽宁. 水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (ZUO Qi ting, DOU Ming, WU Ze ning. Planning and Management of Water Resources[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [14] 窦明慧. 蒸发对气候的影响及相应雨水管理措施[A]. // 2010年中国城市雨洪控制利用高级研讨会论文集[C]. 北京: 高等教育出版社, 2010. 315-319. (DOU Ming hui. The impact of evaporation on the climate and the corresponding measures for the management of rainwater[A]. // The Paper Set of High Level Seminar on Urban Rainwater and Flood Control in China in 2010[C]. Beijing: Higher Education Press, 2010. 315-319. (in Chinese))
- [15] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009. (LV Cui mei. Research on ecological economic value of regional water resources based on emergy theory[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009. (in Chinese))
- [16] 于贵瑞, 王秋凤, 于振良. 陆地生态系统水-碳耦合循环与过程管理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 831-839. (YU Gui Rui, WANG Qiu Feng, YU Zhen liang. Study on the processes of water-carbon coupling cycles and management[J]. Progress in Geography, 2004, 19(5): 831-839. (in Chinese))
- [17] Yu G R, Song X, Wang Q F, et al. Water use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables[J]. New Phytologist, 2008, 177(4): 927-937.
- [18] 孙向辉, 李力. 水体富营养化及其植物修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(18): 5902-5905. (SUN Xiang hui, LI Li. Research progress on eutrofication of water system and phytoremediation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(18): 5902-5905 (in Chinese))
- [19] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [20] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1293-1298. (LV Cui mei, WU Ze ning. Emergy Analysis for sustainable development assessment of regional water ecological economics system[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2010, 30(7): 1293-1298. (in Chinese))
- [21] 田桂桂, 吴泽宁, 郭溪. 生态水系生态环境效益能值评估方法及其应用[J]. 人民黄河, 2014, 36(8): 76-78. (TIAN Gui gui, WU Ze ning, GUO Xi. Emergy analysis and application for ecological environmental benefits of ecological water system[J]. Yellow River, 2014, 36(8): 76-78. (in Chinese))
- [22] 吴宝华, 刘庆山, 吕锡强. 自然资源经济[M]. 天津: 天津人民出版社, 2002. (WU Bao hua, LIU Qing shan, LV Xi qiang. Natural Resources and Economy[M]. Tianjin: Tianjin Renmin Press, 2002. (in Chinese))