

永定河上游流域水生态系统服务价值评估

答欣¹, 张玉玲^{1,2}, 贾晓宇¹, 熊广森¹

(1. 华北电力大学环境科学与工程系, 河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室, 保定 071003;

2. 华北电力大学环境科学与工程学院, 区域能源系统优化教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 张家口市是首都的水源涵养区和生态功能支撑区, 流经该区域的永定河上游流域发挥着保育水资源的重要作用。为全面认识永定河上游流域水资源生态价值, 对流域水生态各项服务功能开展定量评价。以2017年为基准年, 综合采用InVEST模型与市场价值法系统评估研究区的水源供给量, 以空间和货币的手段直观地表达该地区的水源供给情况; 对于空间数据较难获取的地区, 采用当量因子法评估水土保持与生物多样性价值; 采用分摊法计算水生态旅游价值。结果表明: 其总价值量为55.14亿元, 约占张家口市各区县平均GDP(81.87亿元)的67.35%。其中, 水源供给价值、水力发电价值、水产品生产价值、休闲娱乐价值等直接使用价值为28.64亿元, 土壤保持、河流输沙、生物多样性等间接使用价值为26.50亿元, 水源供给、休闲娱乐和水土保持功能对研究区域水生态系统价值提升和发展具有重要作用。研究区单位面积的生态价值和经济效益分别为0.35亿元和0.23亿元, 生态价值远高于经济效益。本文因地制宜的综合评价方法提升了价值评估的科学性和可靠性, 对于基础数据较为缺乏的地区, 有一定的参考意义。

关键词: 张家口永定河上游流域; 水生态服务; 价值评估

水是生态环境的核心要素, 是支撑整个地球生命系统的基础。水生态系统服务功能是指水生态系统及其生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用, 包括水生态系统直接为人类提供的生态系统服务功能(如水源供给、水力发电等)和间接为人类所利用的土壤保持、生物多样性等生态系统服务功能^[1]。20世纪70年代开始, 生态系统服务功能开始被使用, 之后美国学者Holder等^[2]进一步扩充了生态系统服务功能的范围。此后许多学者开始对不同区域的水生态系统服务功能展开了评价与分析^[3,4]。国内随着赵同谦等^[5]首次将水生态系统作为整体进行综合评价以来, 已相继对河流^[6,7]、水库^[8]、湖泊^[9]、湿地^[10-12]等不同水生态系统的服务价值进行探讨。然而, 目前对于水生态系统服务价值研究主要集中在洞庭湖^[13]、太湖^[14]等经济发达地区, 对经济欠发达的张家口市永定河上游流域的水生态系统服务价值研究鲜有报道, 尚缺乏系统的评估体系。

张家口市作为京津冀西北部生态涵养区的重要组成部分, 流经该区域的永定河上游流域发挥着水源涵养与生态功能支撑的两大重要作用。现张家口市永定河存在水资源缺乏、水环境恶化等突出问题, 完善的生态补偿机制是解决上述问题的重要基础。为获得科学的水生态补偿标准, 水体生态系统各项服务功能的定量评价必不可少。因此, 本文因地制宜、综合运用生态服务评估方法对张家口市永定河流域水生态系统服务价值进行

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2020-01-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001)

作者简介: 答欣(1995-), 女, 山东枣庄人, 硕士, 主要从事流域水污染控制研究。E-mail: zanxin_1995@163.com

通讯作者: 张玉玲(1977-), 女, 河北枣强人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事流域水污染控制研究。

E-mail: zhangyuling_hit@163.com

评估，为合理制定基于服务效能的生态补偿标准提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

永定河发源于山西省宁武县管涔山，在河北省怀来县与洋河汇流，流经内蒙古、河北，经官厅水库进入北京市，全长747 km，流域面积47016 km²，其中上游流域面积的40%分布在张家口市境内，提供了官厅水库80%的水量^[8]。本文研究区为永定河上游流域的张家口市河段，地理位置为113°54′~115°57′E、41°27′~39°34′N。区域面积共17662 km²，占总流域面积的37.57%，研究区共涉及桥东区、桥西区、下花园区、宣化区、万全区、崇礼区、尚义县、怀安县、阳原县、蔚县、涿鹿县、怀来县6区6县（图1）。永定河水系与北京直接相连，在官厅水库以上区域的多年平均地表水资源可达6.3亿m³，地下水资源可达6.4亿m³。张家口市永定河上游流域水生态系统的保育状况是为中下游提供更多更好的水源供给和生态服务的决定因素。

1.2 数据来源

降水、辐射、蒸散数据利用中国气象数据网提供的张家口市12个站点2017年逐月降水观测数据、辐射数据、蒸散数据；研究区土地利用空间数据、行政边界矢量数据、土壤有机质数据从中国科学院资源环境科学数据中心获取（<http://www.resdc.cn>）；发电量信息、水库信息由张家口市水务局提供；水产量信息由张家口市水产养殖站提供；旅游创收信息由张家口市旅游局提供；土地利用面积、水面面积统计数据、地形与水系信息从张家口市国土局获得；粮食作物种类、平均产量与价格来自中国统计信息网（<http://www.tjcn.org>）与《张家口经济年鉴》；年均输沙量实测资料由《张家口市水文统计年鉴》提供；水质信息由张家口市环境监测站提供。

1.3 研究方法

目前，生态系统服务价值的主要分类方法有价值分类法和功能分类法。相比功能分类法，价值分类法从价值与市场联系的角度对其进行分类，已得到国内基本认可^[15]。根据流域水生态系统提供服务的特点，可以把其服务功能划分为提供产品生产功能的直接使用价值的和提供生命支持系统功能的间接使用价值的两大类^[9]。直接使用价值主要包括水源供给、水力发电等；间接使用价值主要包括土壤保持、河流输沙、固碳释氧等功能。为充分反映该地区水生态系统拥有的环境条件与效用，本文选用价值分类法对张家口市永定河上游流域的水生态系统服务价值进行评估。

由于研究区域无大型湖泊和沼泽，因此将研究河流、水库的生态系统服务价值。结

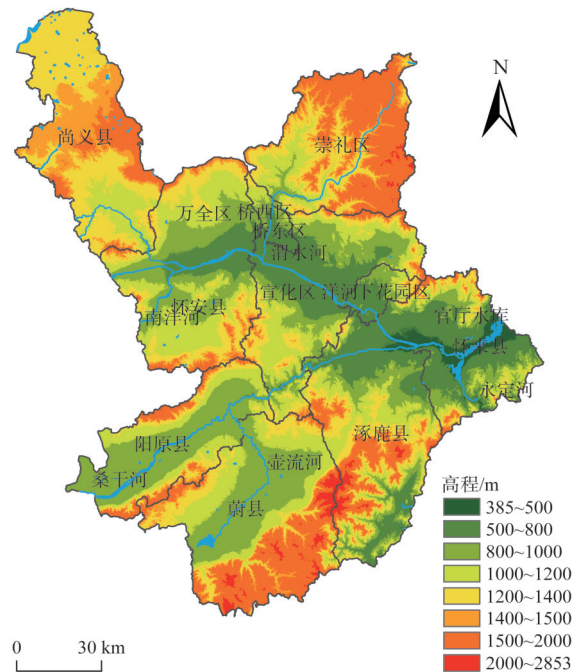


图1 研究区地形与水系图

Fig. 1 Topographic and hydrographic map of the study area

合本次研究目的和张家口的数统现状，对直接服务中的水源供给、水力发电、水产品生产、休闲旅游和间接服务中的土壤保持、生物多样性、河流输沙、调蓄洪水、水质净化、固碳释氧等10项功能进行评价，采用市场价值法、替代花费法、影子工程法、InVEST模型进行价值核算，全面地对张家口市永定河的生态系统服务价值进行评估。具体分析方法详见图2。

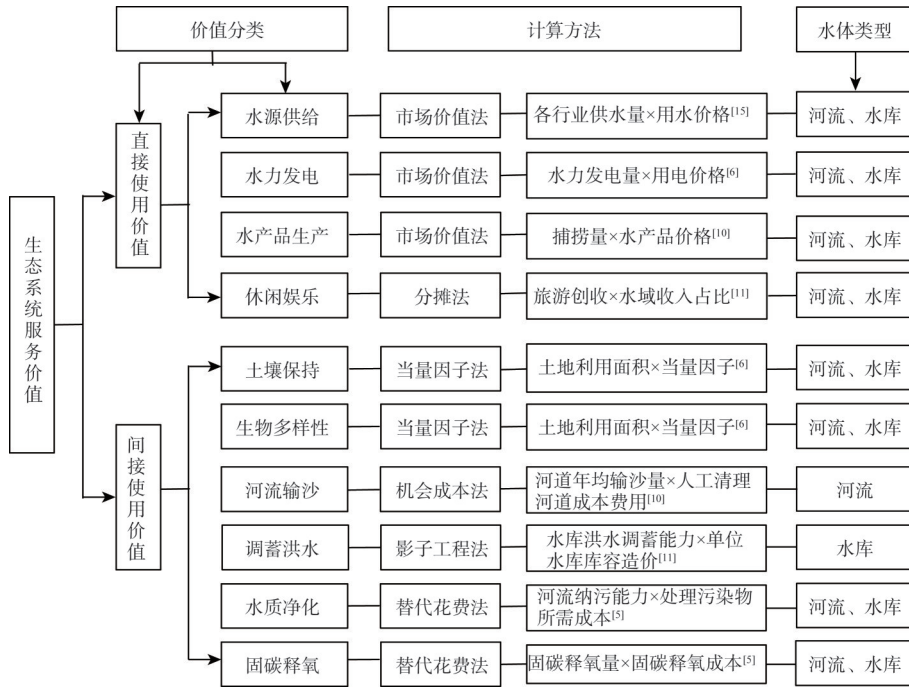


图2 研究区水生态系统服务评价的概念框架图

Fig. 2 Conceptual framework of water ecosystem service evaluation in the study area

1.3.1 直接使用价值的评价方法及参数

研究区水生态系统服务的直接使用价值包括水源供给、水力发电、水产品生产、休闲娱乐价值。

(1) 水源供给价值

水源供给功能的评估应用了InVEST模型中的产水模型。该模型用于模拟一定区域内的地表水源供给量。其计算公式如下^[16-18]：

$$Y_{xy} = \left(1 - \frac{AET_{xy}}{P_x} \right) / P_x \quad (1)$$

$$AET_{xy} / P_x = (1 + \omega_x + R_{xy}) / [1 + \omega_x + (1/R_{xy})] \quad (2)$$

式中： Y_{xy} 为土地利用j、栅格x的水源供给量（mm）； AET_{xy} 为为森林景观类型j中栅格x上的年水源供给量（mm）； P_x 为栅格x的年均降雨量（mm）； R_{xy} 是干燥度指数。 ω_x 是无量纲的非物理参数，计算方法如下：

$$ET_0 = 0.0013 \times 0.0408 \times RA \times (T_{avg} + 17) \times (TD - 0.0123 P_x)^{0.76} \quad (3)$$

$$R_{xy} = (k \times ET_0) / P_x \quad (4)$$

$$\omega_x = Z \times (AWC_x / P_x) \quad (5)$$

式中： ET_0 为潜在蒸散量（mm）； k 表示植被的蒸散系数； RA 为太阳顶层辐射（MJ）； T_{avg} 为年平均气温（ $^{\circ}C$ ）； TD 为年平均最高气温和最低气温的差值（ $^{\circ}C$ ）； Z 为Zhang系数； AWC_x 为植被可利用含水量（mm）。

$$V_a = \sum Q_a W_a \quad (6)$$

式中： V_a 为水供给功能价值量（元）； Q_a 为 a 种的水量（ m^3 ）； W_a 为 a 种水的单位成本价格（元/ m^3 ）。

(2) 水力发电价值

张家口市已建成的水电站有河东、响水铺水电站等。发电价值采用市场价值法。计算公式为^[6]：

$$V_p = \sum Y_p W_p \quad (7)$$

式中： V_p 为水力发电价值（元）； Y_p 为 P 电站年发电量（ $kW \cdot h$ ）； W_p 为单位电价（元/ $kW \cdot h$ ）。

(3) 水产品生产价值

流域水生态系统为人类提供了丰富的水产品，采用如下公式计算^[13]。

$$Y_f = \sum V_{fi} \quad (8)$$

式中： Y_f 为水产品生产价值（元）； V_{fi} 为流域各区县产品价值量（元）。

(4) 休闲娱乐价值

流域水生态系统中的休闲娱乐价值估算方法目前还不多见，这里采用分摊法^[14]。分摊法是衡量研究区水域风光收入占旅游总创收比例的依据，采用该方法对于尚未有水生态旅游分类的地区具有一定的借鉴意义。

1.3.2 间接使用价值的评价方法及参数

研究区水生态系统服务的间接使用价值包括土壤保持、维持生物多样性、河流输沙、调蓄洪水、水质净化、固碳释氧价值。

(1) 土壤保持价值

研究区年降雨较少，风力大，土壤风蚀现象较突出。草地、森林可以在一定程度上减缓风蚀现象、湖泊可以淤积泥沙。这里采用当量因子法估算其土壤保持价值^[19,20]。参照2015年谢高地等^[19]制定的单位面积价值当量因子表，如表1所示。

土壤保持价值计算公式如下：

$$C = 1/7 \sum_{i=1}^n \frac{m_j p_j q_j}{M} \quad (i=1, \dots, n) \quad (9)$$

式中： C 为农田的提供食品价值（元/ hm^2 ）； i 为生态系统服务种类； j 为作物种类，研究区主要作物有莜麦、马铃薯等； p_j 为 j 种作物平均价格（元/t）； q_j 为 j 种作物单产（ t/hm^2 ）； m_j 为 j 种作物面积（ hm^2 ）； M 为 n 种作物总面积（ hm^2 ）。

$$P_{id} = p_{id} \times C \quad (10)$$

表1 部分单位面积生态系统服务价值当量表

Table 1 Ecosystem service value equivalent scale for some unit areas

生态系统分类		服务类型	
一级分类	二级分类	土壤保持	生物多样性
农田	旱地	1.03	0.13
	水田	0.01	0.21
森林	针叶	2.06	1.88
	针阔混交	2.86	2.60
	阔叶	2.65	2.41
	灌木	1.72	1.57
草地	草原	0.62	0.56
	灌草丛	2.40	2.18
	草甸	1.39	1.27
湿地	湿地	2.31	7.87
荒漠	未利用土地	0.13	0.12
	裸地	0.02	0.02
水域	水系	0.93	2.55
	冰川积雪	0	0.01

$$V_d = S_d \times P_d \quad (11)$$

式中： P_{id} 为*d*类生态系统*i*种生态系统服务单位面积价值 [元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]; p_{id} 为*d*类生态系统*i*种生态系统服务单位面积价值当量; C 为农田提供食品价值 (元/ hm^2); V_d 为区域生态系统服务总价值 (元); S_d 为*d*类生态系统面积 (hm^2); P_d 为*d*类生态系统服务价值 (元/年)。

(2) 生物多样性价值

研究区水生态系统生境优越, 适宜多种动植物生存, 依据2017年《张家口市生态浮游生物调查报告》, 浮游植物5门49种; 浮游动物3类11种; 底栖动物1类1种。这里采用当量因子法^[19,20]估算流域水生态系统生物多样性服务价值。

(3) 河流输沙价值

河流输沙是指河水运移泥沙、疏通河道的功能。应用机会成本法对河湖输沙价值^[13]进行估算。计算公式为:

$$V_h = A \times P \quad (12)$$

式中： V_h 为研究区河流输沙价值 (元); A 为年均河流输沙量 (万t); P 为人工清河费用 (元/t)。

(4) 调蓄洪水价值

调蓄洪水是指湖泊、水库、沼泽等蓄积洪水水量、调节洪峰的作用。由于研究区内无大中型沼泽地与湖泊 (不足 30 km^2), 因此本文主要评价水库的调蓄洪水能力。调蓄洪水价值可用影子工程法^[14]计算。计算公式为:

$$V_q = V \times t \quad (13)$$

式中： V_q 代表调蓄洪水的价值 (元); V 代表流域可调蓄水量 (t); t 代表单位价格 (元/t)。

(5) 水质净化价值

河流、水库有一定的自净能力, 能够净化多种排入水体的污染物。本研究拟通过计算水体的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与TP的去除效能, 力图反映水生态系统的净水功能和价值, 可采用替代花费法^[5]评估该部分价值。计算公式为:

$$V_j = C \times V \quad (14)$$

式中： V_j 为水质净化价值 (元); C 为处理每吨污水的成本 (元/t); V 为污染处理量 (t)。

(6) 固碳释氧价值

采用替代花费法^[5]计算固碳释氧价值, 研究区水生态系统内的植物通过光合作用和呼吸作用与大气交换 CO_2 和 O_2 , 维持了流域内大气中的 CO_2 和 O_2 的动态平衡。计算公式如下:

$$V_g = C_c \times P_c + O \times P_o \quad (15)$$

式中： V_g 代表固碳释氧价值 (元); C_c 代表固碳量 (t); P_c 为国际通用碳税率的价格 (元/t); O 代表释放氧气量 (t); P_o 为工业制氧的价格 (元/t)。

2 结果分析

2.1 直接使用价值

2.1.1 水源供给价值

利用InVEST水源供给模型对整个区域及各区县进行水源供给价值评估, 结果如图3所示。由图3可见, 研究区水源涵养功能突出, 其东部地区为水源涵养的核心区与重点区, 西部水源涵养量较低。永定河上游流域总的水源供给量为14.23亿 m^3 , 其中, 涿鹿县、沽源县、蔚县和崇礼区由于降雨量较大, 潜在蒸散量较小, 因此水源涵养量较大, 而桥西区、桥东区和下花园区由于降雨量少, 早晚温差大, 潜在蒸散量较大, 因此水源供给

量较少。评估结果表明降水和潜在蒸散量是水源供给量的重要影响因素。

依据《张家口市2017年水资源公报》，可得出用水量比例。根据市场价值法，结合张家口市各行业用水价格（实地调查），计算出永定河上游流域水源供给功能总价值约为12.71亿元。

2.1.2 水力发电价值

水利发电价值数据如图4所示。由图4可见，目前已开发的主要是农村水电站，主要集中在怀安县、涿鹿县、下花园区等。研究区内水电站总发电量为3455.16万kW·h，电力售价采用当地居民用电价格0.42元/kW·h，则水力发电服务价值为0.15亿元。张家口市永定河上游提供了官厅水库80%的水量，其水能蕴藏量较丰富，但是作为京津冀西北部生态涵养区的重要组成部分，其干流水能资源不宜过度开发，水力发电价值将不会大幅增加。

2.1.3 水产品生产价值

根据张家口市经济信息网及经济年鉴提供的2017年的水产行业统计数据（图5），计算得出研究区水产品的经济价值为0.87亿元。其中，怀来县水产价值远高于其他区县，这是由于怀来县水库数量较多且距离北京近，水产品生产价值相对较高。张家口市被定位为京津的“菜篮子”，预计未来该部分价值将会增加。

2.1.4 休闲娱乐价值

2017年研究区旅游业年均总收入为121.22亿元，其中水域风光类收入约为18.18亿元（图6）。依据国家旅游局发布的《2012年入境旅游者抽样调查综合分析报告》中的调查数据，与研究区实际水域旅游收入占比大致相同，水生态系统在旅游创收中的比例为12.3%^[21]。如图7所示，可以得出张家口市水生态系统的休闲娱乐价值为14.91亿元。张家口市崇礼区作为2022年冬奥会举办地之一，将吸引众多游客前来游览，预计休闲娱乐价值将会逐年上升。

2.2 间接使用价值

2.2.1 土壤保持价值

采用上述当量因子法，研究区单位面积农田提供食物生产价值为479.93元/(hm²·a)，由图8可知，研究区土壤保持价值为11.81亿元，其中，张家口市市区（桥东区、桥西区）

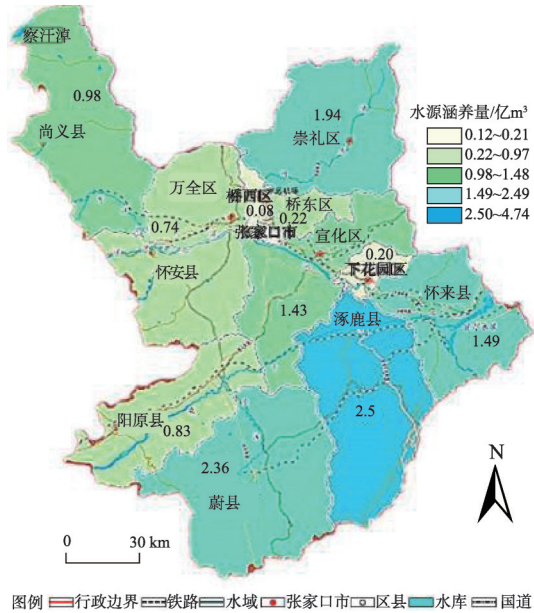


图3 研究区各区县水源供给图
Fig. 3 Water supply map of each district (county) of the upper reaches of the study area

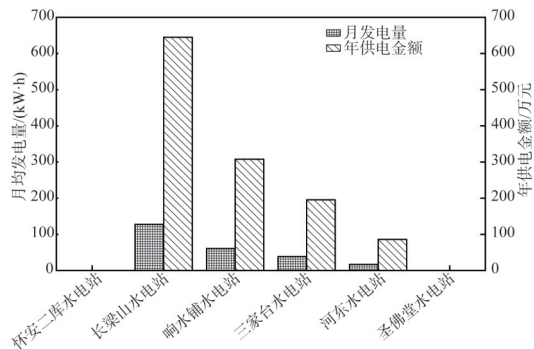


图4 研究区水电站发电量及供电金额
Fig. 4 Power generation and power supply of hydropower stations in the upper reaches of the study area

与下花园区由于行政面积小、土地利用多为建筑用地,因此土壤保持价值偏低。

2.2.2 生物多样性价值

利用谢高地等^[19,20]有关生物多样性当量价值的计算方法,可得出研究区生物多样性价值为10.83亿元。如图9所示,崇礼区与尚义县由于农用地与水域面积较大,其生物多样性相对较高。

2.2.3 河流输沙价值

根据2017年张家口市水文数据中年均输沙量实测资料,研究区的河流年总输沙量为98.93万t,实地调查得到人工清理河道成本费用为4.0元/t。该地区河流输沙的经济价值为0.04亿元(图10),其中,由于洋河干流与南洋河经过怀安县,其输沙量远高于其他区县。

2.2.4 调蓄洪水价值

研究区内现共有64座可调蓄洪水的水库,主要包括友谊水库、壶流河水库等,总库容约为7218.81万 m^3 。根据张家口市永定河流域综合整治规划,研究区内新建三座水库,分别为石湖水库、南洋河水库和土夭沟水库,其建设总库容为21080万 m^3 ,根据全国水库建设投资测算,建设1 m^3 库容需每年投入成本0.67元^[21],可计算研究区水库的洪水调蓄价值约为1.90亿元。

另外,研究区已建成江河堤防77 km,保护人口42.85万人,保护耕地3.295万 hm^2 ,利用影子工程法,则其河堤调蓄洪水价值为0.95亿元^[22]。如图11,研究区调蓄洪水总价值为2.85亿元。

2.2.5 水质净化价值

2017年研究区主要污染物的容纳量分别是:COD为13261.59 t/年, NH_3-N 为663.08 t/年,TP为132.61 t/年。河流、湖泊的氮磷净化功能可按生活污水处理成本COD 307元/t, NH_3-N 9150元/t,TP 2500元/t^[9],如图12,研究区的水质净化价值为0.11亿元。其中,阳原县、怀来县、涿鹿县水质净化价值较高,由于桑干河流经阳原县、涿鹿县,怀来县位于永定河区段,且上述区县人均GDP排名靠后,工业发展较其他

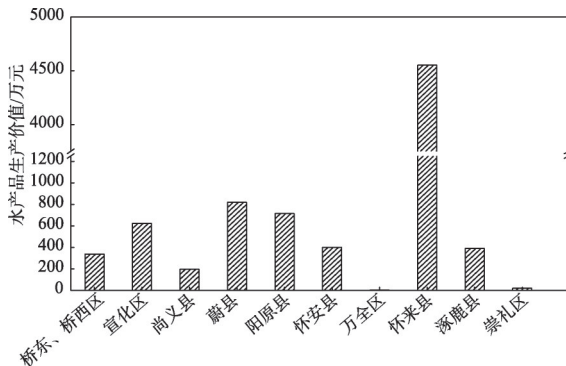


图5 2017年研究区水产品产值

Fig. 5 Production status of aquatic products in each district (county) of the study area

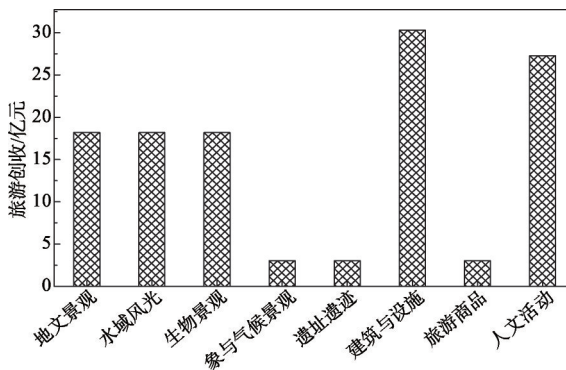


图6 研究区旅游资源创收情况

Fig. 6 Income from tourism resources in the study area

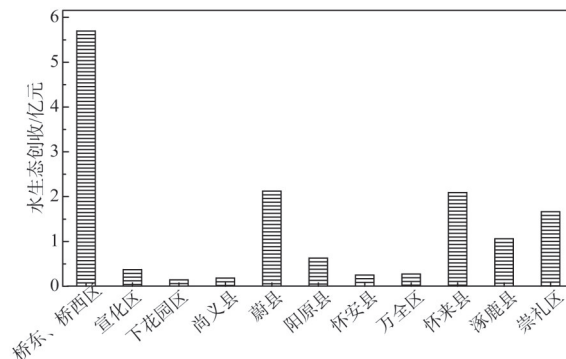


图7 研究区水生态旅游休闲娱乐价值

Fig. 7 Value of recreational activities of water ecotourism of the study area

区县稍缓慢，因此水质净化价值较高。

2.2.6 固碳释氧价值

研究区中型浮游植物日初级产量为 $2.0 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，浮游植物每生产 1 g 干物质能固定 3.67 g CO_2 ，释放 $2.67 \text{ g O}_2^{[23]}$ ，研究区水面面积为 157.13 km^2 ，张家口市无霜期 130 d ，水生态系统总固定 CO_2 量为 5.62 万 t ， O_2 总释放量为 4.09 万 t 。 CO_2 的价格则可以参考碳税 1242 元/t ， O_2 的价格可以参考工业制氧的价格 $400 \text{ 元/t}^{[24]}$ ，各区县固碳释氧价值如图 13 所示，研究区固碳释氧的价值为 0.86 亿元 。

2.3 生态系统服务价值的结果分析

通过前面选择的各类服务功能指标及相应计算方法，得出研究区水生态系统服务功能总价值达 55.14 亿元 ，如图 14 所示，约占 2017 年张家口市各区县平均 GDP (81.87 亿元) 的 67.35% 。在服务功能总价值中，直接使用价值 28.64 亿元 ，其中水源供给、休闲娱乐价值占比突出；间接使用价值为 26.50 亿元 ，占服务功能总价值的 48.10% ，其中土壤保持与维持生物多样性价值占比较大。当水源供给价值较大时，水力发电、水产品生产等价值较低，存在竞争关系，表明水源供给功能的实现是以降低直接使用功能为代价，张家口市永定河上游流域为充分发挥其水源涵养功能，必将会牺牲部分经济发展的机会；当水源供给服务价值占比较大时，休闲娱乐价值、土壤保持价值与维持生物多样性价值也较大，二者存在着较大的协同关系。

研究区各区县的生态系统服务价值占比如图 15 所示，张家口市中心（桥东区和桥西区）、崇礼区和怀来县占比较高，分别为 14.36% 、 14.06% 和 14.71% 。其中，桥东区、桥西区位于市中心，每年接待游客量巨大，因此其休闲娱乐价值较高；崇礼区水源供给与土壤保持功能突出，为 2022 年冬奥会的举办提供了重要的资源支撑；怀来县境内由于水库居多，其生态系统服务价值多集中在水力发电、水产品生产与休闲娱乐等直接使用价值。下花园区与万全区生态系统服务功能与上述区县存在差距，分别占 1.55% 、 3.54% ，下花园区与万全区由于其行政

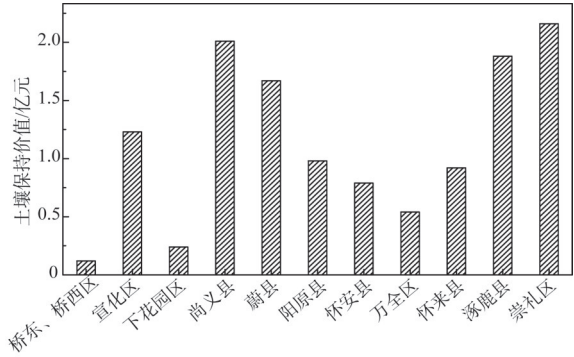


图8 研究区土壤保持价值

Fig. 8 Soil conservation value of the study area

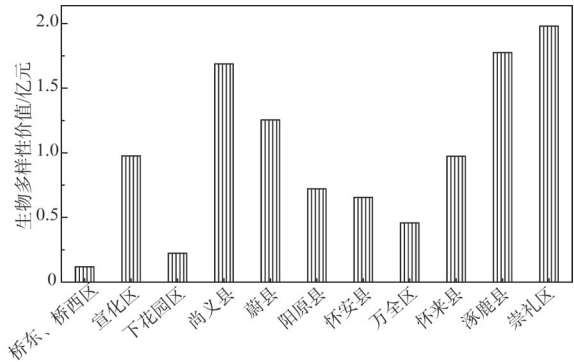


图9 研究区生物多样性价值

Fig. 9 Biodiversity value of the study area

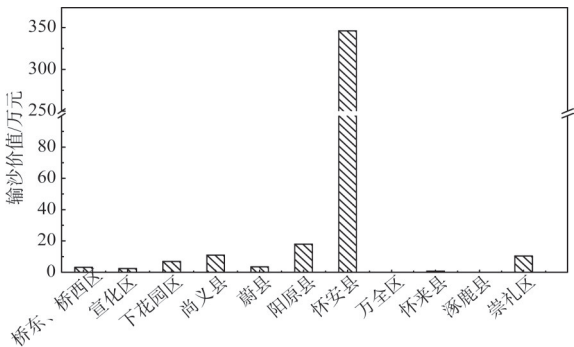


图10 研究区年均输沙价值

Fig. 10 Annual average sediment transport value of the study area

面积小,土地利用状况单一,其土壤保持与生物多样性价值较低。

根据计算结果,2017年研究区水面面积取 157.13 km²,则单位面积生态服务价值产值为 0.35 亿元;2017年研究区工业 GDP 为 372.50 亿元,建筑面积取 1630.53 km²,得到单位面积工业 GDP 为 0.23 亿元。结果表明,研究区生态价值远高于实际的经济效益^[21]。因此,若生态补偿长效机制落实,张家口市的生态收益远高于现有工业的经济收益。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 本文首次对永定河上游流域的张家口地区水生态服务价值进行了系统评估,并分区县探讨了各价值的特点,有利于直观定量地表述研究区水生态系统中的能量传递与物质循环。张家口地区当前缺乏长效生态补偿机制,生态系统服务价值的直观数字可作为补偿标准上限制定的科学依据和参考标尺。

(2) 本文综合采用 InVEST 模型与市场价值法评估了研究区的水源供给量,以空间和货币的手段直观地表达了该地区的水源供给情况;对于空间数据较难获取的地区评估其水土保持与生物多样性价值,能够采用广谱性好的当量因子法;对于没有水生态旅游分类的地区评估其休闲娱乐价值,可以采用具有特征地区适应性的分摊法。因此,上述评估手段的综合利用,不仅为其他基础数据较为缺乏的地区提供了生态服务价值评估的系统方法,还提升了评估结果的科学性和可靠性,其评估结果可作为流域水环境管理参考标尺和决策依据。

(3) 研究表明,永定河上游流域张家口区域内水生态系统服务价值总量为 55.14 亿元。其中,直接使用价值为 28.64 亿元,间接使用价值为 26.50 亿元;单位面积的生态价值和经济效益分别为 0.35 亿元与 0.23 亿元,生态价值远高于经济效益^[25]。

(4) 各项水生态服务功能价值量的顺序为:休闲娱乐>水源供给>土壤保持>生物多

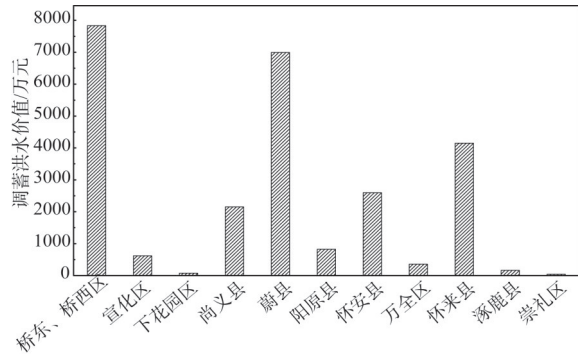


图 11 研究区洪水调蓄价值

Fig. 11 Annual average sediment transport value of the study area

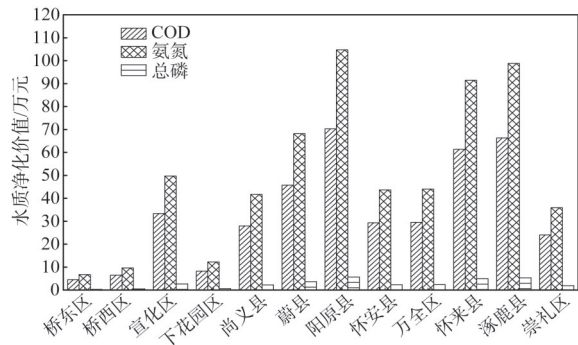


图 12 研究区水质净化价值

Fig. 12 Value of water purification in the study area

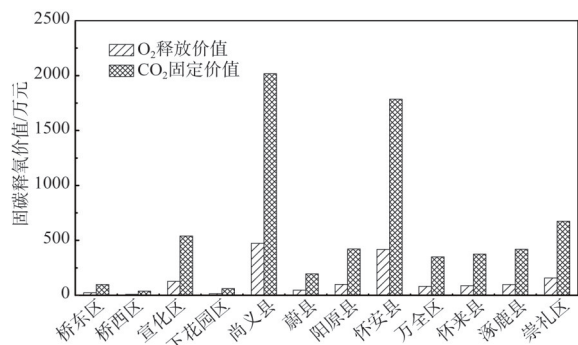


图 13 研究区固碳释氧价值

Fig. 13 Value of carbon fixation and oxygen release in the study area

样性>调蓄洪水>水产品生产>固碳释氧>水力发电>水质净化>河流输沙。其中，水源供给、休闲娱乐价值分别占总价值的27.05%、23.06%，表明张家口市永定河上游流域作为天然的水源储存地，为旅游业的发展提供了物质基础；由于降雨量全年偏低，研究区调蓄洪水价值稍低；水质净化与河流输沙价值最低，表明该地区在提升水环境承载力与保证河流输沙方面亟需改善。水源供给与水力发电、水产品生产存在竞争关系，与休闲娱乐、土壤保持、维持生物多样性存在协同关系，因此，张家口地区作为京津冀地区的重要生态屏障和水源涵养地，在传统农牧业发展受到一定控制时，该地区可以逐步有序发展水生态旅游，大力提升其文化服务效益。本文对比了各区县的生态系统服务价值，桥东区、桥西区、崇礼区和怀来县水生态系统服务价值占比较高，下花园区与万全区占比较低，这是由于桥东区、桥西区位于市中心，休闲娱乐价值最高，永定河干流流经怀来县，清水河发源于崇礼区，其产品提供与休闲娱乐价值突出。

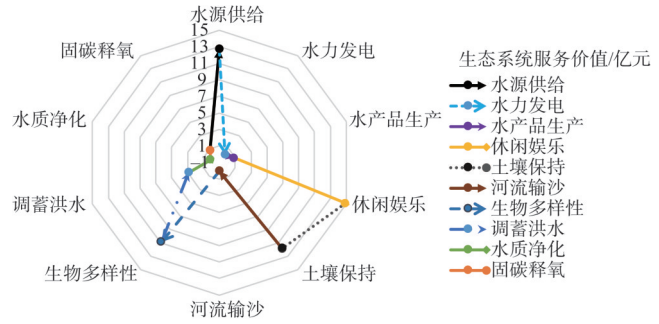


图 14 研究区生态系统服务价值雷达图

Fig. 14 Radar map of ecosystem service value in the study area

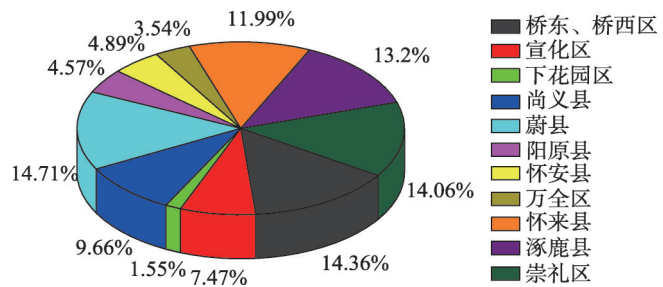


图 15 研究区各区县生态系统服务价值占比

Fig. 15 Ratio of ecosystem service value in each district (county) of the study area

桥东区、桥西区、崇礼区和怀来县水生态系统服务价值占比较高，下花园区与万全区占比较低，这是由于桥东区、桥西区位于市中心，休闲娱乐价值最高，永定河干流流经怀来县，清水河发源于崇礼区，其产品提供与休闲娱乐价值突出。

3.2 讨论

由于水生态系统服务价值的评估不仅所需数据量大、数据类别多，而且涉及多个部门，因此难以获得全面的数据。评估休闲娱乐价值时，仅考虑了旅游价值，对水文化方面的价值研究较少，因此休闲娱乐价值估算略低于实际值。水质净化功能只考虑了TP、NH₃-N与COD的去除效能，后续环保部门完善监测数据后，将纳入更多污染物指标，该部分价值比实际值偏小。水力发电价值调研范围主要在农村水电站，待后续水务局统计信息完善后，该部分价值将会有所提升。本文只对2017年研究区域水生态的服务价值做了静态评估，尚未展开多年动态研究，因此，系统评估水生态系统服务价值连续变化情况，将是下一步的研究内容。

参考文献(References):

[1] CAIRNS J. Protecting the delivery of ecosystem services. *Ecosys Health*, 1997, 3(3): 185-194.
 [2] HOLDER J, EHRLICH P R. Human population and the global environment: Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force. *American Scientist*, 1974, 62(3): 282-297.
 [3] BINGHAM G, BISHOP R, BRODY M, et al. Issues in ecosystem valuation: Improving information for decision making. *Ecological Economics*, 1995, 14(2): 73-90.
 [4] HENRY R, LEY R, WELLE P. The economic value of water resources: The Lake Bemidji survey. *Journal of the Minne-*

- sota Academy of Science, 1988, 53(3): 37-44.
- [5] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 自然资源学报, 2003, 18(4): 443-452. [ZHAO T Q, OUYANG Z Y, WANG X K, et al. Ecosystem service and their valuation of terrestrial surface water system in China. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 443-452.]
- [6] 宋福强, 李卓卿, 肖俞, 等. 西藏朋曲河流域淡水生态系统服务价值评估. 西南大学学报: 自然科学版, 2018, 40(9): 142-149. [SONG F Q, LI Z Q, XIAO Y, et al. A value assement of freshwater ecosystem service in Pengqu River Basin, Tibet. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2018, 40(9): 142-149.]
- [7] 陈明叶, 刘素红, 于连海, 等. 大清河阜平流域生态系统结构变化的服务价值响应研究. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1376-1389. [CHEN M Y, LIU S H, YU L M, et al. Response of ecosystem service value to ecosystem structure change in Fuping Basin of the Daqinghe River. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1376-1389.]
- [8] 文一惠, 马良, 谢婧. 生态服务功能空间转移定量研究: 以官厅水库流域为例. 环境保护科学, 2018, 44(1): 95-102. [WEN Y H, MA L, XIE Q. Quantitative research of ecosystem service function space: A case of Guanting reservoir watershed region. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(1): 95-102.]
- [9] 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. 生态经济, 2013, (9): 163-180. [CAO S K, CAO G C, CHEN K L, et al. Evaluation of use value of water ecosystem service functions in the Qinghai Lake. *Ecological Economy*, 2013, (9): 163-180.]
- [10] 杨青, 刘耕源. 湿地生态系统服务价值能值评估: 以珠江三角洲城市群为例. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4527-4537. [YANG Q, LIU G Y. Wetland ecosystem services assessment based on emergy: A case of Pearl River Delta Urban Agglomeration. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(11): 4527-4537.]
- [11] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 等. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1654-1665. [LI Z, JIANG W G, WANG W J, et al. Study on the wetland leading service function of Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration based on the ecosystem service value. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1654-1665.]
- [12] 杨薇, 靳宇弯, 孙立鑫, 等. 基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2516-2528. [YANG W, JIN Y W, SUN L X, et al. Determining the intensity of the trade-offs among ecosystem services based on production-possibility frontiers: Model development and a case study. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2516-2528.]
- [13] 李景保, 常疆, 李杨. 洞庭湖流域水生态系统服务功能经济价值研究. 热带地理, 2007, 27(4): 311-316. [LI J B, CHANG J, LI Y. Study on economic value of service function of freshwater ecosystem in Dongting Lake Basin. *Tropical Geography*, 2007, 27(4): 311-316.]
- [14] 梁鸿, 潘晓峰, 余欣繁, 等. 深圳市水生态系统服务功能价值评估. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1474-1485. [LIANG H, PAN X F, YU X F, et al. Valuation of water ecosystem services in Shenzhen city. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1474-1485.]
- [15] 赵海兰. 生态系统服务分类与价值评估研究进展. 生态经济, 2015, 31(8): 26-33. [ZHAO H L. Research progress of classification and value evaluation of ecosystem services. *Ecological Economy*, 2015, 31(8): 26-33.]
- [16] GABRIELA T D, MILTON C R, ADRIANO P P. Ecosystem services modeling as a tool for defining priority areas for conservation. *Plos One*, 2016, 4: 1-19.
- [17] LI D L, WU S Y, LIU L B, et al. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [18] FU B, WANG Y K, XU P, et al. Value of ecosystem hydropower service and its impact on the payment for ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 338-346.
- [19] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of China's ecosystem services. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.]
- [20] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of ecosystem service value method based on unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [21] 杨文杰, 赵越, 赵康平, 等. 流域水生态系统服务价值评估研究: 以黄山市新安江为例. 中国环境管理, 2018, 4: 100-106. [YANG W J, ZHAO Y, ZHAO K P, et al. Evaluation on the ecosystem services value of the Xin'anjiang River in Huangshan. *China Environmental Management*, 2018, 4: 100-106.]
- [22] 杨文斌, 查雪琴, 高顺峰, 等. 安徽漳河流域生态系统服务价值评估. 湿地科学与管理, 2017, 13(2): 25-29. [YANG W B, ZHA X Q, GAO S F, et al. Valuation of ecosystem services of Zhanghe River in Anhui. *Wetland Science and Management*, 2017, 13(2): 25-29.]

- [23] 孟庆义, 欧阳志云, 马东春. 北京水生态服务功能与水管理. 北京: 科学出版社, 2010, 1: 9-11. [MENG Q Y, OUYANG Z Y, MA D C. Water Ecosystem Services and Water Management of Beijing. Beijing: Science Press, 2010, 1: 9-11.]
- [24] 朱晓博, 高甲荣, 李诗阳, 等. 北京市永定河生态系统服务价值评价与研究. 北京林业大学学报, 2015, 37(4): 90-97. [ZHU X B, GAO J R, LI S Y, et al. Evaluation and study of ecosystem service value in Yongding River of Beijing. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(4): 90-97.]
- [25] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 等. 生态系统服务功能管理研究进展. 生态学报, 2013, 33(3): 702-710. [ZHENG H, LI Y F, OUYANG Z Y, et al. Progress and perspectives of ecosystem services management. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 702-710.]

Evaluation on the ecosystem services value of the upper reaches of Yongding River

ZAN Xin¹, ZHANG Yu-ling^{1,2}, JIA Xiao-yu¹, XIONG Guang-sen¹

(1. Hebei Key Lab of Power Plant Flue Gas Multi-Pollutants Control, Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China; 2. MOE Key Laboratory of Resources and Environmental Systems Optimization, College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Zhangjiakou city is the water conservation area and ecological function supporting area of Beijing, the capital of China. The upper reaches of Yongding River in Zhangjiakou play an important role in preserving water resources. In order to get a better understanding of the ecological value of water resources in the study area, various water ecological service functions were quantitatively evaluated in this study. With 2017 as the base year, and the InVEST model and market value method, the water supply in the study area was comprehensively evaluated and intuitively expressed by means of space and currency. In the study area, where spatial data were difficult to obtain, soil and water conservation and biodiversity values were evaluated with the equivalent factor method. The aquatic ecotourism value was calculated with the apportionment method. The results show that the total value is ¥ 5.514 billion, accounting for about 67.35% of the GDP (¥ 8.187 billion) of Zhangjiakou city. The water supply value, hydropower generation value, aquatic product production value, leisure and entertainment value and other direct service values reach ¥ 2.864 billion. Soil conservation, river sediment transport, biodiversity, and other indirect service values reach ¥ 2.650 billion. Water supply, recreation, and soil and water conservation functions play an important role in enhancing the value of regional aquatic ecosystems. The ecological value and economic value per unit area of the study area are ¥ 35 million and ¥ 23 million, respectively, and the ecological value is much higher than the economic value. At the same time, the comprehensive use of the above assessment methods has improved the reliability of the evaluation method and has certain reference significance in the areas without enough basic data.

Keywords: upper reaches of Yongding River in Zhangjiakou city; water ecosystem services; value evaluation