

Study on Environmental Flow in Beijing Section of Yongding River

Shifeng Zhang¹, Xiaofei Liu¹, Rui Li¹, Deyong Kang²

¹Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Science and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²Beijing Investment Center for Water Affairs, Beijing

Email: zhangsf@igsnr.ac.cn

Received: Mar. 16th, 2016; accepted: Mar. 29th, 2016; published: Apr. 12th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The Beijing section of Yongding River is an artificial rebuilt river. The environment flow study is of great significance on ecology and environment rebuilt in a polluted watershed and river course. The principle of environment flow in an artificial river is studied in this paper. First of all, the ecological goal theory and specific ecological objectives are studied for different purposes. This paper indicates that environmental flow in an artificial rebuilt river includes ecological base flow, water evaporation and infiltration in the artificial river and lakes, and water demand of the riverside plants. In this research, the natural river course is abstracted and generalized based on specific requirements of different sections of natural river course and artificial river bed; the artificial river cross-section is designed subsequently. Furthermore, this paper has divided the content of consumptive and non-consumptive environmental flow. Based on the ecological targets decided, research result of the consumptive and non-consumptive environmental flow is calculated in the case study as follows: 1) the ecological base flow of the gorges section and the plain section is $0.79 - 4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ under the basis of the lowest to best target; normally the main course flow is included only in the low objective and some tributary environment flow could be also included in the higher objective; 2) the consumptive water demand of the urban plain section and rural plain section is $2.81 - 9.17 \times 10^7 \text{ m}^3$ under different ecological targets, among which the water demand for evaporation and infiltration of the artificial river and lake is $3.40 - 5.87 \times 10^7 \text{ m}^3$; the water demand for riverside plant is $3.30 \times 10^7 \text{ m}^3$ for different ecological targets. The research indicates that the environmental flow of the artificial rebuilt river is related to the transect of the river, the roughness of the river course, the ratio of longitudinal slope, and the seepage prevention works in the course. In the case of water limitation, the above factors could be adjusted to regulate environmental flow for proper ecological targets.

作者简介: 张士锋(1965-), 男, 副研究员, 主要从事水文水资源研究。

文章引用: 张士锋, 刘晓菲, 李瑞, 康德勇. 永定河北京段生态需水量研究[J]. 水资源研究, 2016, 5(2): 108-119.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.52014>

Keywords

Yongding River, Artificial Rebuilt River, Environmental Flow, Consumptive Water Demand, Non-Consumptive Water Demand

永定河北京段生态需水量研究

张士锋¹, 刘晓菲¹, 李 瑞¹, 康德勇²

¹中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京

²北京水务投资中心, 北京

Email: zhangsf@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2016年3月16日; 录用日期: 2016年3月29日; 发布日期: 2016年4月12日

摘 要

永定河北京段是人工重建河道, 人工重建河道的生态需水量估算是河道修复研究中的重要课题。永定河北京段生态需水主要包括生态基流, 人工重建河道的河湖蒸散发和渗漏量以及河滨带植被的生态补水量等。根据研究河段的不同要求, 本文概化了天然河道, 设计了人工河道断面形状和河床特征, 较为清晰地划分了消耗性生态需水和非消耗性生态需水的范畴。在确定各种生态需水目标前提下, 计算不同河段的消耗性生态需水和非消耗性生态需水量。结果显示, 北京市最低到最优生态的目标下, 永定河山峡段和平原河段的生态基流需水量为 $0.79 - 4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$; 平原城市段和平原郊野段的河湖和河滨带植被用水 $0.28 - 0.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中河湖蒸发渗漏用水 $0.34 - 0.59 \times 10^8 \text{ m}^3$, 河滨带植被用水 $0.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。研究显示, 人工河道的生态基流与河道断面、河道粗糙度、纵坡比及河道防渗关系密切。为满足生态修复目标, 在水量受到限制的情况下, 可以通过调整人工河道的断面、粗糙度、水力坡度和河道渗透性来达到相应的生态需水量。

关键词

永定河, 人工重建河道, 生态需水, 消耗性需水, 非消耗性需水

1. 引言

在气候变化和人类活动背景下, 我国华北地区出现了大量的河道断流、生态退化现象。由于经济社会用水量不断加大, 很多流域水资源过度开发现象严重, 挤占了必要的生态需水量, “有河皆干、有水皆污”是这一地区河流的主要特征。近年来, 部分地区开始了河道的生态治理与修复, 河流湖泊化、人工化的特征逐渐显现。人工重建河道的生态需水量估算是河道修复研究中的重要课题, 由于人工重建河道兼有河道内和河道外生态需水的需求, 其生态需水量既包括非消耗性的生态基流, 也有河湖湿地的蒸发渗漏等一系列消耗性的河道外需水。

河道生态需水是指河流在一定的生态目标下, 为了维持某一特定生态系统的基本生态功能应保持的最小需水量[1]-[3]。河道生态需水量既是生态需水量的起源, 也是生态需水研究的核心。多年来国内外学者对河道内的生态需水量做出大量研究, 已形成了一些相对成熟的方法[4]-[7], 包括水文学法[8]、水力学法[9]、生境法、综合法等[10] [11]。不同的计算方法各有其适用条件和适用范围[12]-[14], 例如对于普通只有河道水量要求的一般采用水文学法, 对于人工重建河道、来水量波动较大的自然河道可采用水力学法, 对于有特殊生物群落生存栖息

的河流采用生境法。生态需水评估方法的选择应综合考虑生态目标、河流类型、计算结果的精度要求以及资料占有量等[15]-[17]。

随着生态修复研究的逐渐兴起[18]-[20]，与人工重建河道相关的政策、规划和技术问题引发众多学者及机构的关注[21]-[23]。联合国教科文组织(UNESCO)国际水文计划第八阶段战略计划(IHP-VIII: 2014-2021)的主题之一就是生态水文学，包括“提升水与生态系统恢复力和生态系统服务的生态水文学系统解决方案和生态工程”和“生态水文调控，以维持和恢复陆地到海岸的连通性及生态系统功能”在内的多个重点领域与人工重建河道的生态需水研究直接相关。因此，人工重建河道生态需水量问题也是当前水文学研究的一个重大需求。事实上，目前对生态需水量的研究中还存在诸多问题：首先对于生态目标的讨论和应用还不是十分完备，其次对于消耗性生态用水与非消耗性生态用水的研究存在不足，传统方法一般按照河道内生态需水和河道外生态需水进行划分，但是对其中的重复量的研究较为模糊，再其次，对于人工重建河道的生态需水量中各种人工渠道的概化、明渠渗漏水量的控制等都有待进一步探索。鉴于区域生态治理的逐渐扩大化和系统化，这一问题的研究和解决将为抑制生态系统恶化趋势，恢复生态系统的服务功能提供技术支撑。同时，因为人工重建河道生态系统的复杂性，其生态需水量问题的探索也具有重要的研究意义。

2. 研究方法

生态目标的确定是河流生态需水研究的出发点。研究人工重建河道生态需水，需要以目标河流的自然状态、社会经济状况等要素为基础，确定生态目标后，进行生态需水量的研究。河道生态需水量的研究方法主要包括水文学方法和水力学方法等，植被耗水则需要根据相应的蒸散发模型进行模拟[24] [25]。

2.1. 生态目标确定方法

河道生态目标的确定依据是保证河道生态系统健康，实现河道物质运输、生物栖息和迁徙通道的生态功能。永定河北京段生态目标主要包括：1) 保持自然河段生态系统基本形态，实现河道泥沙平衡及水生生物繁殖的水流目标；2) 保证人工重建河段湖泊水深及水面面积；3) 保证人工重建河段河滨带植被面积目标等。河道生态系统对径流、湖泊、河滨带植被需水的要求一方面体现生态系统自身健康对水位、水面、水质等参数的要求，更重要的是体现在流域生态系统对河道物质运输和生物迁徙通道功能的要求。生态环境需水量生态目标具有功能、空间及时间差异性。其中功能和空间差异性体现在不同结构的河道内不同类型生物种群对物理环境的要求不同，需要针对不同类型河道提出不同功能的需水量计算目标。生态目标时间差异性体现在河道水生生物随年内季节变化对物理环境的要求存在差异[26]。

2.2. 用水文学方法计算生态基流

水文学方法一般是首先对系统进行描述，包括水量、持续时间、淹没频率等。主要关注最小流量和水位的保持，该法又称为标准设定法或快速评价法。即根据简单的水文指标对河流流量进行设定，例如平均流量的百分率或者天然流量频率曲线上的保证率。国外代表方法有 Tennant 法[8]、Texas 法、NGPRP 法、BF 法[11]。国内代表方法有月(年)保证率法，基本生态需水量法[10]。

Tennant 法侧重统计规律，基于历史流量记录的基础上将平均每年自然流量的简单百分比作为基流，更适宜于季节性为基础的需求。该方法以预先确定的年平均流量百分数作为河流推荐基流量，不需要现场观测。在美国，该法通常应用于优先度不高的河段进行流量研究，或者作为其他方法的一种检验。在不同生态目标下通常将年平均流量的 10%~30% 作为最小的河流生态需水量。

2.3. 水力学方法计算生态基流

人工重建河道一般为较规则的明渠水流，明渠水流需要根据渠道的类型运用水力学方法计算生态流量[9]。

水力学方法是根据河道水力参数,包括河宽、水深、断面面积、流速和湿周等,确定河流所需流量,代表方法为水力半径法。水力半径法以谢才公式为基础,该水力半径对应的流量即为生态需水量。

$$Q = AV \quad (1)$$

式中: A 为过水断面面积,单位 m^2 ; V 为过水断面的平均流速,单位 m/s 。

假设河流为明渠恒定均匀流,由谢才公式:

$$V = C\sqrt{RS} \quad (2)$$

式中: R 为水力半径,单位 m ; S 为水面坡降; C 为谢才系数。由曼宁公式:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

式中: n 为粗糙系数,将(2)、(3)式代入(1)式得到:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: Q 为流量,单位为 m^3/s ; n 为粗糙系数; A 为过水断面面积,单位是 m^2 ; R 为水力半径,单位 m ; S 为水面坡降。

2.4. 水面蒸发和植被耗水的研究方法

生态需水量还包括人工湖泊水面蒸发和植被的蒸散发,根据中国科学院地理科学与资源研究所有关水面蒸发的研究成果[24],我国华北地区水面蒸发量的计算方法为:

$$E_0 = 0.144(1 + 0.75 u_{1.5}) [D + d(T_{1.5})(\alpha - 1)T_{1.5}] \quad (5)$$

其中, $u_{1.5}$ 为 1.5 m 高度风速,以 m/s 计; D 为饱和水汽压差,以毫巴计; $d(T_{1.5})$ 为饱和水汽压斜率,毫巴/°C; $\alpha - 1$ 为温度层结调节系数; $T_{1.5}$ 为 1.5 m 处气温,°C。

植被蒸散发计算首先根据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸发能力[25],潜在蒸发是在充分供水条件下植被的蒸散发量。1998 年联合国粮农组织推荐公式:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (6)$$

式中: ET_0 为参考蒸散量,单位 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$; R_n 为净辐射量,单位为 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$; G 为土壤热通量,单位 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$; T 为日平均气温(°C); u_2 为 2 m 高处的风速,单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; e_s 为饱和水汽压,单位 kPa ; e_a 为实际水汽压,单位 kPa ; $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差(kPa); Δ 为饱和水汽压斜率($\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$), γ 为湿度计常数,单位 $\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$ 。

3. 研究区概况与生态目标的确定

3.1. 永定河北京段概况

永定河水系是海河流域的一级支流,流域总面积 $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中北京境内流域面积约 3168 km^2 。永定河北京段,为官厅水库以下的幽州站到梁各庄区间,区间长度为 169.4 km ,其中三家店以上的官厅山峡段 91.2 km ,为自然河流段,三家店以下为平原河段,长度 78.2 km 。三家店以上的山峡区间来水量少,导致三家店以下常年断流,示意图如图 1 所示。目前生态修复和治理的主要对象是永定河北京段的平原河段,是典型的人工重建河道。永定河北京段主要河段基本特征值见表 1。

永定河北京段的重点生态维护地区为城市段三家店到卢沟桥区间,分布有五大湖区,从上到下分别是门城湖、莲石湖、园博湖、晓月湖和宛平湖,河段总长度为 18.4 km ,平原城市段由五大湖泊和贯行溪流连接而成。其主要特征值见表 2。

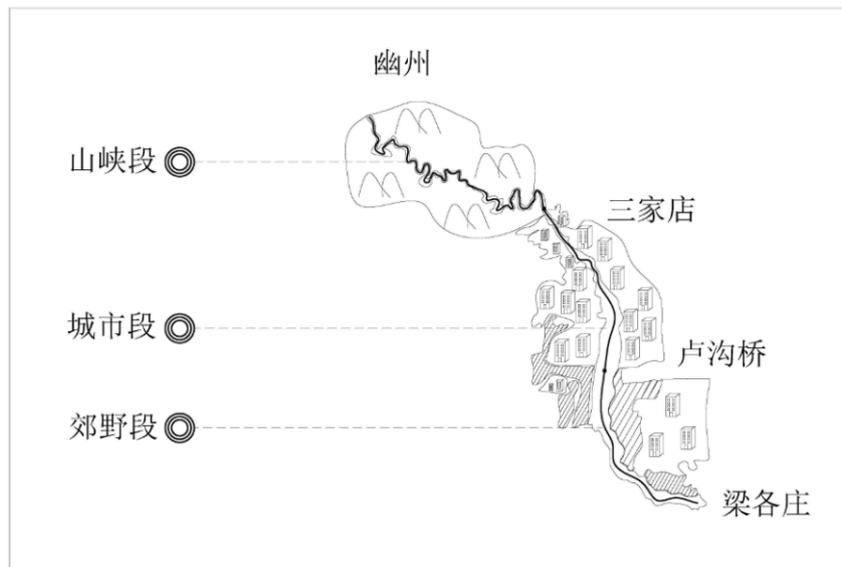


Figure 1. The sketch of Yongding River in Beijing
图 1. 永定河北京段示意图

Table 1. The major characteristic value of the river course
表 1. 主要河段特征值

	长度(km)	坡度(‰)	河宽(m)	落差(m)
山峡段	91.2	3.1	70~300	283
平原城市段	18.4	2.5	500~1500	46
平原郊野段	59.8	0.38~1	200~1900	30
北京段	169.4	2.1	70~2000	359

Table 2. The key characteristic values of the urban plain river and lake section
表 2. 平原城市段重要河湖特征值

	门城湖	莲石湖	园博湖	晓月湖	宛平湖	合计
河段长/m	5240	5800	4200	1850	1310	18,400
河段宽/m	294	376	580	430	420	
河底高程/m	86.39~102	69.3~86.39	61.47~69.3	57~61.47	54.5~57.0	
坡度/‰	2.98	2.98	1.88	2.42	1.91	2.25
湖长/m	3300	3400	2700	1850	1310	12,560
平均湖宽/m	170	300	240	300	400	285
平均水深/m	1.5	1.8	1.8	1.5	1.0	
水面面积/ha	61.9	109.2	96.3	55.5	52.4	375.3
其中：湖泊/m	56.1	102	91.8	55.5	52.4	357.8
溪流长/m	1940	2400	1500	0	0	5840
溪流面积/ha	5.8	7.2	4.5	0	0	17.5

3.2. 永定河生态目标的确定

3.2.1. 永定河北京段生态需水类型

永定河北京段的生态需水包括四个部分，第一是天然河流的生态基流量，第二是人工贯行溪流的生态基流量，第三是人工重建河段重点湖泊的生态需水量，包括蒸发和渗漏，第四是河滨带植被耗水量。其中天然河道的生态基流是过境性质的，有一定的消耗量，但是其主体并不完全损耗于基流的维持；人工河道的河湖湿地需水中一部分用于蒸散发和渗漏，另外一部分也要根据水质要求及时补水和替换，保障河湖的环境质量；对于河滨带植被的灌溉用水，则完全是消耗性的。

永定河山峡段是自然河段，生态需水的主要类型是生态基流和部分河湖的蒸发与渗漏。永定河人工河段从山前三家店开始到出口梁各庄结束，长度共 78.2 km，可以划分为两个部分，其中三家店到卢沟桥段长 18.4 km，为城市平原段，是生态治理的核心；从卢沟桥到梁各庄为平原郊野段，长 59.8 km。永定河三家店到梁各庄段的生态需水类型包括水面湿地的蒸发渗漏补水、河滨带绿化补水、特种绿地用水、贯行溪流用水和湖泊水质更换补水。其中湖泊蒸发渗漏补水量是用于补充景观湖泊、溪流、湿地等蒸发渗漏损失的水量。河滨带绿化补水是维持河滨带绿化的需水量，是生态治理的重要目标。北京市永定河流域的年降水量仅为 513 mm 左右，其中山区和平原地区降水量分别为 500 mm 和 559 mm，不足以维持绿化用水需求。一部分河滨绿化带的维持需要人工补水，这是永定河生态构建中生态需水的必要组成部分。

3.2.2. 生态目标

根据永定河生态重建的要求和河道来水情况，可以把生态需水目标定为最低、适宜和最优三个层次目标。人工湖泊蒸发渗漏、贯行溪流等生态需水都要按照不同的目标确定补水阈值。城市河滨带灌溉补水采用相同标准，本研究不做分类。针对人类活动强烈干扰的永定河，设立生态目标如下：

最低生态目标，基流为来水量(包括区域产流和上游来水)的 10%，消耗性生态需水仅能保证城市段河湖生态用水和河滨带植被用水。

适宜生态目标，基流为来水量的 30%，人工河道保持适宜景观水面。此时可以在城市段增加对地下水的回补。在郊野段利用贯行溪流可以保障一定的生态流量，使永定河全河都成为有水的河。

最优生态目标，基流为来水量的 60%，人工河道逐步恢复为自然河流。此时郊野段的河滨带植被用水得到保证，实现多滩多库有水有绿的最佳目标。

4. 生态需水量估算结果

4.1. 山峡段的生态需水量

永定河山峡段的生态需水量包括生态基流和河道的水面蒸发与渗漏两个部分。其中生态基流是非消耗性的，蒸发渗漏则是消耗性的。生态基流的计算方法采用 Tennant 法，在低、中、高三种生态目标下。本研究对永定河北京官厅山峡段的生态基流量的选择系数为 10%、30% 和 60%。按照有关资料统计，永定河 1956~2013 年多年平均径流量为 $1.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，入境水量为 $6.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，合计 $7.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，按照低、中、高三种不同的生态目标，永定河官厅山峡段的生态基流需水量分别为 0.79、2.37 和 $4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

官厅山峡段主要河道和水库等的蒸发渗漏，是该河段生态需水的重要组成部分。这部分水量取决于河湖水面面积和下渗速率。以 1981~2012 年北京气象站点数据为基础，采用在我国华北地区应用效果较好的水面蒸发模型，即公式(5)，计算得到北京市多年平均水面蒸发量为 1124 mm。根据北京市水资源规划数据，永定河山区多年平均降水量为 500 mm，实际需要补水量为 624 mm。依据永定河山峡区间的特征断面数据，河道过水横断面按照平均 30 m^2 进行计算，可以计算得到山峡区间的河道水面蒸发量为 $1.71 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

山峡区间的地质变异性大，平均下渗率为 1.93~20 mm/d，按照较为保守的渗漏率计算，山峡段渗漏量为 0.20

$\times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此，山峡段的年蒸发渗漏损失为 $0.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

4.2. 平原段人工溪流生态需水量

平原段分为两个部分，平原城市段和平原郊野段。城市段指三家店到卢沟桥区间，分布有五大湖泊，是永定河生态重建的重点，从上到下分别是门城湖、莲石湖、园博湖、晓月湖和宛平湖，湖泊之间用人工溪流连接，河段总长度为 18.4 km。郊野段从卢沟桥以下到北京市的出口断面梁各庄，长 59.8 km，平原郊野段均为人工河道。人工贯行溪流是永定河北京段的重要特征，其生态需水是非消耗性的，需水量计算不能按照天然的 Tennant 方法，而是按照明渠流进行设计计算。溪流断面设计为梯形断面设计，无论是城市段还是郊野段都是如此。鉴于城市段与郊野段生态目标不同，断面尺寸有所不同。城市段中贯行溪流的水面宽为 24~30 m，对于卢沟桥以下的郊野段，溪流宽度为 10~16 m。横断面坡度 1:5，水深 0.6 m，溪流断面见图 2，图 3。

按照公式(1)~(4)，根据城市段的坡比、水力半径等，可以获得城市段的流速为 0.37~0.90 m/s，生态流量为 5.98~14.56 m^3/s ，年生态需水量为 1.89 - 4.59 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。郊野段纵坡比范围 0.38‰~0.65‰，结合设计的断面尺寸，可以获得郊野段的流速为 0.35~0.45 m/s，生态流量为 2.69~3.52 m^3/s ，年生态需水量为 0.85 - 1.11 $\times 10^8 \text{ m}^3$ ，计算结果见表 3。

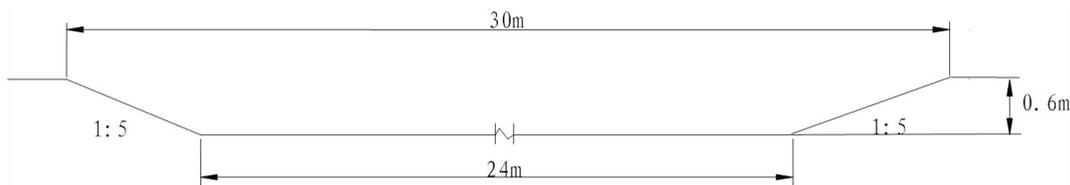


Figure 2. The transect diagram of the stream in urban area
图 2. 城市段溪流横断面示意图

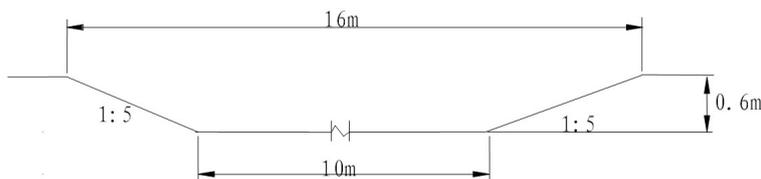


Figure 3. The transect diagram of the stream in rural area
图 3. 郊野段溪流横断面示意图

Table 3. The environmental flow of the artificial rebuilding river course
表 3. 人工重建河道生态基流

方案	坡度 (%)	水力半径 (m)	溪流宽 (m)	断面面积 (m^2)	谢才系数	流速 (m/s)	流量 (m^3/s)	年需水量 (亿 m^3)
城市段	2.25	0.54	30	16.2	25.78	0.90	14.56	4.59
	1.5	0.54	30	16.2	25.78	0.73	11.89	3.75
	0.65	0.54	30	16.2	25.78	0.48	7.83	2.47
	0.5	0.54	30	16.2	25.78	0.42	6.86	2.16
	0.38	0.54	30	16.2	25.78	0.37	5.98	1.89
郊野段	0.65	0.488	16	7.8	25.35	0.451	3.52	1.11
	0.5	0.488	16	7.8	25.35	0.396	3.09	0.97
	0.38	0.488	16	7.8	25.35	0.345	2.69	0.85

4.3. 平原段重点河湖生态需水量

平原段五大湖区的生态需水是永定河北京段生态治理的核心。平原段的河湖生态需水包括湖泊水面蒸发、渗漏等消耗性生态需水。根据表 2 提供的五个重点湖泊和贯行溪流的主要参数。平原重点河湖的水面蒸发按照北京市水面蒸发 1124 mm 计算,城市平原段水面积为 375.3 ha,其中湖泊面积 357.8 ha,人工贯行溪流面积 17.5 ha,永定河平原段降水量为 559 mm,需补水量为 565 mm。因此,城市平原段的五湖地区和连接贯行溪流蒸发补水量为 $2.12 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。另外卢沟桥以下的平原郊野段的水面面积为 95.7 ha,相应的生态需水量为 $5.41 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

根据平原段的生态目标,需要分别考虑补给和不补给地下水两种情况。第一种情况是不考虑地下水的生态补水,河湖溪流在防渗情况下的渗漏率为 1.93 mm/d;第二种情况是在水资源较为充分时,需要设计一定量的地下水生态补给,在这一目标下,渗漏率可达 20 mm/d,因此不同生态目标平原河段河湖下渗量分别为 $0.33 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $3.44 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

综上,平原段河湖水面蒸发渗漏需水量在防渗条件和稳定控渗目标下的生态需水量分别为 $0.60 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $3.70 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

4.4. 河滨带植被生态需水量

河滨带植被生态需水量是人工重建河道生态需水的另一个重要组成部分。河滨带植被主要分布在平原河段,包括城市河段和郊野河段。

平原段的植被需水量按照公式 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型计算,即公式(6),根据北京市 1981~2012 年气象资料得到平均潜在蒸散量为 864 mm。由于永定河平原段多年平均降水量为 559 mm,径流系数为 0.24,需补水量为 439 mm。

按照河滨带植被面积的规划,永定河北京段平原城市段五个湖泊地带的滩地面积为 366.3 ha,郊野段河滨带植被面积为 7152 ha,为最优生态需水目标,由此计算城市段河滨带需水量为 $0.16 \times 10^7 \text{ m}^3$,郊野段河滨带需水量为 $3.14 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

4.5. 不同生态目标下生态需水量

通过以上分析计算,得到永定河北京段在不同生态目标下非消耗性生态需水量和消耗性生态需水量。

1) 非消耗性生态需水量

非消耗性生态需水包括山峡段生态基流和平原段生态基流。在不同生态目标下,永定河山峡段的生态需水量分别为 0.79、2.38 和 $4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从三家店到卢沟桥的城市段在最低生态目标下不需要人工贯行溪流,在适宜和最优生态目标下的生态需水量分别为 $1.89 - 4.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。卢沟桥以下的平原郊野段在最低生态目标下不需要人工溪流,但是在适宜和最优生态目标下的生态流量为 $0.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $1.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此,不同河段的生态基流需水量为 $0.79 - 4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间。

2) 消耗性生态需水量

消耗性生态需水包括天然河段山峡段和人工河段平原段的水面蒸发渗漏、河滨带植被生态补水。根据不同的生态目标,永定河山峡段天然河流生态需水为 $2.168 \times 10^7 \text{ m}^3$;平原城市段人工河流的生态需水为 $0.64 - 3.11 \times 10^7 \text{ m}^3$,其中人工湖泊和人工贯行溪流用水 $0.48 - 2.95 \times 10^7 \text{ m}^3$,河滨带植被补水 $0.16 \times 10^6 \text{ m}^3$;平原郊野段生态需水量为 $0 - 3.89 \times 10^7 \text{ m}^3$,其中人工溪流用水 $0 - 0.75 \times 10^7 \text{ m}^3$,河滨带植被补水 $0 - 3.14 \times 10^7 \text{ m}^3$,见表 4。

3) 永定河北京段生态需水量

在最低生态目标下,需要保证山峡段生态需水、城市河段的重点湖泊、人工贯行溪流需水和河滨带植被耗水要求,消耗性生态需水量为 $0.28 \times 10^8 \text{ m}^3$,生态基流需水为 $0.79 \times 10^8 \text{ m}^3$;在适宜生态目标下,需要考虑重点湖泊区间的地下水回补需水要求、平原郊野段的水面维持,相应消耗性生态需水量为 $0.60 \times 10^8 \text{ m}^3$,生态基流

Table 4. The ecological water needed on different target (unit: 10^4 m^3)表 4. 不同生态目标下生态补水量(单位: 万 m^3)

	长度(km)	最低	适宜	最佳
山峡段	91.2	2168.01	2168.01	2168.01
平原城市段	18.4	637.23	3112.54	3112.54
平原郊野段	59.8		752.68	3892.41
北京段	169.4	2805.24	6033.13	9172.96

需水为 $0.85 - 2.38 \times 10^8 \text{ m}^3$; 在最优生态目标下, 还需要应保障平原郊野段的河滨带植被的生态需水, 此时消耗性生态需水量为 $0.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, 生态基流需水为 $1.11 - 4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

5. 永定河北京段人工重建河道生态需水量讨论

人工重建河道的生态需水量研究涉及生态需水目标的确定和调整、人工重建河道的概化以及不同类型生态需水之间的关联等。

1) 生态目标的确定与调整

生态目标的确定是估算生态需水量的基础。要确定生态目标, 则需要对河道的生态目标进行定位。例如永定河人工重建河道的定位为“一河两岸、多滩多库、水草搭配、河湖相连”, 在此基础上, 提出保持一定的水面景观、维持水量平衡和可操作性等原则。一般而言, 生态目标与生态需水量为正比例关系。生态目标愈高, 则需水量愈大, 人工重建河道生态需水量也是如此。

具体的生态目标根据当地水资源条件可设计为最低、适宜和最优等不同目标级别。在最低目标下基流最小, 河湖水面达到基本生态目标, 水生物种等遭到一定程度的破坏, 河道出现断流现象; 适宜生态目标下, 生态基流满足河道基本物种的生存需要, 但是特殊物种的繁衍需求难以满足, 景观水面可以满足一般的旅游观光需要; 最优的生态目标下生态基流接近自然状态, 河湖水面良好, 河道及其相关物种恢复到破坏之前的状态。

根据气候和水资源条件的变化及社会总体需求, 一个地区或某一人工河道的生态需水目标可以有所调整。20 世纪末期, 北京市一些河段因为水资源不足, 其生态需水目标可以从高目标降为中低目标, 然而, 进入 21 世纪后, 因为有了南水北调工程配置的新水源, 其生态目标可以从中低目标调整为较高的需水目标。

2) 人工重建河道的概化要素与生态需水量的关系

人工重建河道的生态需水量一般取决于河道断面、粗糙度、纵向坡度和河道渗透性等。首先是河道断面, 河道一般按照明渠设计, 渠道的形状以梯形为主。根据地质条件和服务目标的不同, 概化的形状还有矩形、三角形和圆弧形。根据水力学原理, 在相同过水断面面积条件下, 圆弧形水渠的水力半径相对较小, 流速小, 需水量小, 在施工条件允许下应尽可能选用。除断面外, 渠道的粗糙度是另一个重要因素。渠道根据需要可以采用砂壤土、黏土、碎石、砖砌、混凝土等, 其糙度依次从大到少, 水流速度则依次加快。最后, 河道的纵向坡度是决定河流速度和生态水量的关键因素。人工河道的坡度一般由自然条件决定, 但是, 为了减少生态基流需水量, 可以采用区间跌水的方式进行集中消能减小水流速度。

河道渗透性与生态需水量也密切相关。透水性较好的河流, 治理时一般进行防渗处理。防渗设施的渗透性差异很大, 常规复合土的渗透系数为 $5.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 而膨润土防水毯和土工膜的渗透系数可达 $5.0 \times 10^{-11} - 1.0 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 。在使用低渗透性的膨润土防水毯和土工膜时, 为了维持水生态系统健康, 可以采取人为措施, 调整土工膜的搭缝和连接的方法适当提高透水性, 达到 20 mm/d , 即 $2.0 - 3.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 同时也兼顾了地下水的回补功能。

3) 非消耗性生态需水与消耗性生态需水之间的关系

人工重建河道的生态需水量主要涉及两个方面, 第一是河道的基流, 即生态流量, 是维持河道健康的主要指标, 是非消耗性生态需水量; 第二是维持一定水体需要的蒸散发、渗漏的补水量, 是消耗性生态需水量。这两种生态需水量属性各不相同, 在某一河段甚至还有一定的重复和交叉, 但是在开展生态需水配置时, 因为基流部分在本研究的人工河段的下游还要继续发挥生态功能, 因此需要分开计算。

上下游生态基流之间的关系是生态需水研究的另外一个问题。以永定河为例, 需考虑人工重建河道和原有的山区天然河道, 这两部分生态基流都是非消耗性的。上中下游各河段的生态需水量可以重复利用, 在这种情况下, 只需要取最大值即可。但是不同生态目标下的基流, 应注意上下游关系, 一般上游大于下游, 天然河段大于人工河道。对于人工河道中的超大生态基流, 应该以上游自然河道的基流成果为标准进行校核。由于本文考虑了生态目标的选取、不同生态需水属性和人工河道断面的概化, 可是永定河北京段的生态需水量成果较为可靠。

6. 结论

本文以永定河北京段为案例, 开展人工重建河道生态需水量研究, 取得以下认识和结论:

1) 生态目标是生态需水研究的基础。人工重建河道的生态需水兼有河道内需水和河道外需水的两种属性。进行生态需水研究首先要确定生态需水的类型和目标。生态需水按照需求可以划分为最低生态需水、适宜生态需水和最优生态需水量等不同的目标。随着水资源条件和社会发展需求的变化, 人工重建河道的生态需水目标可以进行调整。

2) 人工重建河道的生态需水分为两个部分, 非消耗性生态基流和消耗性河湖绿地用水。北京市永定河人工重建河道的基流按照从最低到最优生态目标需水量为 $0.79 - 4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$, 另外还需要河湖和河滨带植被用水 $0.28 - 0.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中河湖蒸发渗漏用水 $0.34 - 0.59 \times 10^8 \text{ m}^3$, 河滨带植被用水 $0.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3) 人工河道的生态基流与河道断面、河道粗糙度、纵坡比和河道渗透率关系密切。为达到生态修复目标, 在水量受到限制的情况下, 可以通过调整人工河道的断面、粗糙度、水力坡度和河道渗透性来满足相应的生态需水量。

基金项目

中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-301-04)和国家自然科学基金项目(41171032)。

参考文献 (References)

- [1] THARME, R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 2003, 19(526): 397-441. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.736>
- [2] 杨志峰, 刘静玲, 孙涛, 等. 流域生态需水规律[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-288. YANG Zhifeng, LIU Jingling, SUN Tao, et al. *Environmental flows in basins*. Beijing: Science Press, 2006: 1-288. (in Chinese)
- [3] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 50-54. YANG Zhifeng, CUI Baoshan, LIU Jing, et al. *The theory, method and practice of the ecological water demand*. Beijing: Science Press, 2003: 50-54. (in Chinese)
- [4] KING, J., LOUW, D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 1998, 1(2): 109-124. [http://dx.doi.org/10.1016/S1463-4988\(98\)00018-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1463-4988(98)00018-9)
- [5] HUGHES, D. A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow. *Journal of Hydrology*, 2001, 241(1-2):140-151. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00378-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00378-4)
- [6] ARTHINGTON, A. H., PUSEY, B. J. Flow restoration and protection in Australian rivers. *River Research and Applications*, 2003, 19(526): 37-395. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.745>
- [7] HUGHES, D. A., HANGAR, P. A. Desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow require-

- ments of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(3-4): 167-181.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00290-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00290-1)
- [8] TENNANT, D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)
- [9] LIU, C. M., MEN, B. H. An ecological hydraulic radius approach to estimate the instream ecological water requirement. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(3): 32-39.
- [10] 刘苏峡, 莫兴国, 夏军. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较[J]. *地理学报*, 2006, 61(3): 273-281.
LIU Suxia, MO Xingguo and XIA Jun. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: Curvature technique or slope technique. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 273-281. (in Chinese)
- [11] 刘昌明. 关于生态需求水量的概念和重要性[J]. *科学对社会的影响*, 2002(2): 25-29.
LIU Changming. The conception and importance of ecological water demand. *Impact of Science on Society*, 2002(2): 25-29. (in Chinese)
- [12] ZHANG, X. Y., SHEN, Y. C. A preliminary study on ecological water demand estimation in the arid region—A case in the Qaidam basin. *The Journal of Chinese Geography*, 1999, 9(2): 155-162.
- [13] 王西琴, 刘昌明, 等. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 507-514.
WANG Xiqin, LIU Changming, et al. Research advance in ecological water demand and environmental water demand. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 507-514. (in Chinese)
- [14] 李丽娟, 郑红星. 河流系统的环境与生态需水量: 海滦河流系统的研究[J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 495-500.
LI Lijuan, ZHENG Hongxing. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe basins. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 495-500. (in Chinese)
- [15] 田英, 杨志峰, 刘静玲, 等. 城市生态环境需水量研究[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(1): 101-107.
TIAN Ying, YANG Zhifeng, LIN Jingling, et al. Preliminary study on urban eco-environmental water requirements. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1): 101-107. (in Chinese)
- [16] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估计[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 243-250.
JIA Baoquan, CI Longjun. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 243-250. (in Chinese)
- [17] 贾宝全, 许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类——以新疆为例[J]. *干旱区地理*, 1998, 21(2): 8-12.
JIA Baoquan, XU Yingqin. The conception of the eco-environmental water demand and its classification in arid land—Taking Xinjiang as an example. *Arid Land Geography*, 1998, 21(2): 8-12. (in Chinese)
- [18] 徐菲, 王永刚, 张楠, 孙长虹. 河流生态修复相关研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 515-520.
XU Fei, WANG Yonggang, ZHANG Nan and SUN Changhong. Advances in the assessment of river ecological restoration. *Ecology and Environment*, 2014, 23(3): 515-520. (in Chinese)
- [19] 倪晋仁, 刘元元. 论河流生态修复[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1029-1043.
NI Jinren, LIU Yuanyuan. Ecological rehabilitation of damaged river system. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1029-1043. (in Chinese)
- [20] 吴建寨, 赵桂慎, 刘俊国, 姜广辉, 彭涛, 刘旭. 生态修复目标导向的河流生态功能分区初探[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1843-1850.
WU Jiangzhai, ZHAO Guishen, LIU Junguo, JIANG Guanghui, PENG Tao and LIU Xu. River eco-regionalization oriented by ecological restoration. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 1843-1850. (in Chinese)
- [21] 翁白莎, 严登华, 赵志轩, 张诚, 王刚. 人工湿地系统在湖泊生态修复中的作用[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(12): 2514-2520.
WENG Baisha, YAN Denghua, ZHAO Zhixuan, ZHANG Cheng and WANG Gang. Roles of constructed wetland system in lake ecological restoration. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(12): 2514-2520. (in Chinese)
- [22] 杨俊鹏, 王铁良, 范昊明, 苏子龙. 河流生态修复研究进展[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 299-304.
YANG Junpeng, WANG Tieliang, FAN Haoming and SU Zilong. Research progress of river ecological restoration. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(6): 299-304. (in Chinese)
- [23] 董哲仁, 孙东亚, 彭静. 河流生态修复理论技术及其应用[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(1): 4-10.
DONG Zheren, SUN Dongya and PENG Jing. Theories and practices of river eco-restoration. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2009, 40(1): 4-10. (in Chinese)
- [24] 洪嘉琏, 王淑清. 京津塘地区水面蒸发估算及其分布特征[J]. *地理研究*, 1991, 6(1): 182-188.
HONG Jialian, WANG Shuqing. Estimation and distribution characteristics of evaporation from water surfaces in Bei Jing, Tian Jin and Tang Shan areas. *Geographical Research*, 1991, 6(1): 182-188. (in Chinese)
- [25] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. and SMITH, M. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water

requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

- [26] 孙涛, 杨志峰. 基于生态目标的河道生态环境需水量计算[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 43-48.
SUN Tao, YANG Zhifeng. Calculation of environmental flows in river reaches based on ecological objectives. Environmental Sciences, 2005, 26(5): 43-48. (in Chinese)