

基于河道功能及满意度的老运粮河生态需水量研究

李抒苒¹, 周思斯², 郑钰¹, 杜鹏飞¹

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 河海大学 环境学院, 南京 210098)

摘要:生态补水对于恢复受污染水体的自然属性以及重建河道的景观功能具有重要作用。为配合滇池水体整治,本文以典型入滇河流昆明老运粮河为研究对象,基于其蓄洪、生态调节与保育及景观水体的功能界定并计算其生态需水量,同时考虑补水成本经济性进行基于满意度的需水量修正。修正后,支流小路沟、七亩沟生态需水量分别为3 100和19 000 m³/d,下游入湖段生态需水量为34 000 m³/d,其生态-经济满意度依次为80%、80%、100%。本研究对城市人工河道生态需水量的计算及基于实际的成本-效益权衡问题进行了有意义的实践,为城市人工河道补水工程的方案设计提供了一定参考价值。

关键词:生态需水量;河道功能;满意度;生态补水;老运粮河;昆明

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2016)05-0032-05

Study on ecological water requirement of old Yunliang river based on river function and satisfaction degree

LI Shuyi¹, ZHOU Sisi², ZHENG Yu¹, DU Pengfei¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ecological water compensation plays very important role for the restoration of natural properties of polluted water body and the reconstruction of landscape function of a river. In order to cooperate the restoration of Dianchi Lake, the paper took old Yunliang river of a typical river into the lake as research object, defined and calculated the ecological water requirement based on its function of flood storage, ecological regulation and landscape provision. It simultaneously considered the economy of water cost to revise the ecological water requirement based on satisfaction degree. After revision, the amount of ecological water requirements of tributaries Xiaolu Ditch, Qimu Ditch and the river's downstream section are 3100 m³/d, 19000 m³/d and 34000 m³/d respectively with the satisfaction degrees of ecological economy of 80%, 80% and 100% accordingly. The paper conducted a significant practice for the calculation of ecological water requirement and the balance of real cost and benefit, and can provide certain reference for the program design of ecological water compensation of urban artificial rivers.

Key words: ecological water requirement; river function; satisfaction degree; ecological water compensation; old Yunliang river; Kunming

滇池作为昆明市的母亲湖,对整个昆明市的经济生活以及人们的生活具有重要作用。然而,目前入滇池的35条主要河流都还存在沿程接纳城市生活污水的情况,水体黑臭,水质劣于地表水V类标准。根据滇池水污染防治的实际需要,昆明市提出,将牛栏江——滇池补水工程作为滇池治理的重要工作,以增大生态水量,增强河水的自净能力,最大限度满足河道生态、景观水量的要求。目前,国内外学

者对生态需水量的界定尚不一致,研究的侧重点各有不同,研究的内容也不够深入^[1-3],已有的用于天然河道的生态需水量计算方法难以直接应用于城市河道。根据解决滨湖城市河道治理共性技术问题的研究目标,本文选择典型纳污河道老运粮河为研究对象,将传统的生态需水量计算方法与城市人工河道的特点相结合,从老运粮河蓄洪、生态调节与保育及景观水体的功能出发,对生态需水量的概念及计

收稿日期:2016-05-31; 修回日期:2016-07-24

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07302-002)

作者简介:李抒苒(1992-),女,广西河池人,硕士,主要从事水环境系统分析方面的研究。

通讯作者:杜鹏飞(1970-),男,辽宁沈阳人,博士,教授,主要从事区域与城市环境规划及环境系统分析方面的研究。

算方法研究作了有益的补充。此外,本文参考经济学中“效用”的概念,对老运粮河生态需水量理论计算值进行基于满意度的修正,得到生态环境效益与经济效益相协调的补水量,对生态补水工程的成本-效益分析提供了有意义的参考。

1 研究区概况

老运粮河位于云南省昆明市五华区、高新区及西山区,是昆明城区12条防洪排涝河道之一。老运粮河水系暗河段10.8 km,明河段6.9 km,全长共计17.7 km,其主要支流有小路沟、七亩沟等。小路沟全长5.5 km,发源于东方红水库,沿昆沙路西侧向南流,过二环北路、学府路南段,沿二环西路南流,至兴苑路口与七亩沟来水交汇后入下游入湖段,是昆明主城西面及高新区的主要防洪排涝河道之一。该片区没有完善的雨污系统,河道两岸违章建筑较多,严重缩窄河道,河道两侧缺少植物绿化,河水黑臭,水环境质量较差。七亩沟源于顺城河海军办事处,途经小西门、人民西路、市体育馆,至菱角塘入老运粮河入湖段,全长2.13 km,集水面积4.52 km²。该河主要流经主城人口密集区,沿线城市污水主干管网较多。因多年未清污,导致河床淤积严重,排水不畅,防洪标准较低,极易出现淹水情况。目前,在再生水补水的基础上,以降低入滇TN、TP等污染物负荷,提高河道水环境质量为目标,在河道生态修复和生态建设两个层面开展了研究和示范。其中,浅流区再生水砾石河道生态修复工程起点为小路沟普吉路,止点为学府路,示范段长度2 km。缓流区再生水河道生态修复工程起点为小西苑浦路,止点为入湖口,示范段长度2 km。

2 研究方法

2.1 基于河道功能的生态需水量界定

目前,国内外学者对生态需水量没有统一的界定。国外学者对生态需水量的研究主要集中在天然河流生态系统中^[4],而国内学者对生态需水量的研究或停留在定性及宏观定量研究层面上,或仅针对特定的生态系统^[1-2]。本研究从老运粮河作为城市人工河道的特殊性质出发,以老运粮河的主要功能作为其生态需水量计算的依据。

根据《城市水系规划导则》,城市河道景观生态水量主要包括:维持河道生态系统的生态需水量、维持河道水质的最小稀释净化水量、维持河道景观功能要求适宜水深的需水量、维持适宜水面面积的需

水量等四部分^[5-6]。结合老运粮河蓄洪、生态调节与保育及景观水体的功能,对其生态需水量的界定为:在一定的时空范围内,河流(包括河道内、河道外)以满足其河道生态系统需水量、维持河道水质的稀释净化水量以及维持河道景观功能要求适宜水深的需水量。

2.2 生态系统需水量计算

目前,老运粮河尚未发现珍稀动植物,属无特定敏感需水保护目标河流。水文学方法应用广泛,但是精确度不高,而且要求流量系列为天然状态,由于老运粮河受人类活动的剧烈影响,水文学方法受到限制^[7-8]。此外,老运粮河断面形状一定且参数可知。综上,本部分生态需水量可用水力学方法的湿周法计算^[9]。

湿周即过水断面上,河槽被水流浸湿部分的周长。当河流流量增大时,河道断面的湿周也相应增大。当流量达到一定值时,即便流量继续增大,但湿周的增加却很小。此时的河道断面湿周称为临界湿周,当临界湿周得到保护时,在非临界区域,河道生态系统也将得到较好的保护。湿周法的基本步骤为,先建立河道断面的湿周-流量函数关系,绘制湿周-流量曲线并在曲线上找出具有临界湿周的点,其对应的流量即为河道生态系统最小需水量。根据经验,通常可取曲线上曲率最大点或斜率为1的点作为临界点^[9-12]。

假设河流为明渠恒定均匀流,由曼宁公式和谢才公式可得湿周与流量的关系为:

$$Q = \frac{1}{n} A^{5/3} P^{-2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m³/s; n 为糙率; A 为断面面积, m²; S 为水面比降; P 为湿周, m。

不妨分别取流量和湿周的相对值 Q' 、 P' 将流量和湿周无量纲化,以消除坐标轴单位选取不一的影响。

$$Q' = \frac{Q}{Q_{\max}}, \quad P' = \frac{P}{P_{\max}} \quad (2)$$

式中: Q' 、 $P' \in [0, 1]$ 。

对湿周-流量曲线进行趋势线拟合,可得到曲线的函数方程。根据各段湿周-流量曲线,分别取曲线曲率最大点及斜率为1的点所对应的流量作为河流生态系统最小需水量。

2.3 水质稀释净化需水量计算

老运粮河的河宽及水深均较小,可看作一维稳态河流。各类污染物的降解均符合一级反应动力学,假设反应速度常数为定值,可用单一河段水质模型 S-P

模型计算断面各类污染物的浓度。由质量守恒定律,得出河段长度内的污染物质的质量平衡方程。

污染物质的质量平衡方程:

$$Q_0 C_0 + q_1 c_1 + QC = C_N (Q_0 + Q + q_1) + (Q_0 C_0 + q_1 c_1 + QC) \exp\left(1 - \frac{kx_1}{U}\right) \quad (3)$$

式中: Q_0 为来自河流上游的水量, m^3/s ; q_1 为排污口的水量, m^3/s ; C_0 为河流上游水中污染物的浓度, mg/L ; c_1 为排污口的污染物的平均浓度, mg/L ; k 为污染物的降解系数; x_1 为河流长度, m ; U 为平均流速, m/d ; C_N 为地表水水质标准, mg/L ; C 为外调水的水质, mg/L ; Q 为外调水的水量, m^3/s 。

考虑雨季老运粮河由降雨引起的地表径流带入河道的污染物,城市河流污染物稀释净化需水量为:

$$Q = \frac{(q_1 c_1 + Q_0 C_0) \exp\left(-\frac{kx_1}{U}\right) - (Q_0 + q_1) C_N}{\left(C_N - C \exp\left(-\frac{kx_1}{U}\right)\right) \times 86400} \quad (4)$$

2.4 河道景观水深需水量

传统的生态需水量的计算方法,如 R2CROSS 等,均强调足够的景观水深对于景观保持以及水生生物生境适宜的重要性^[13]。本研究结合老运粮河整治规划,小路沟及七亩沟的景观水深取 0.3 m,景观流速取 0.05 m/s。小路沟与七亩沟河段河宽较窄,且硬质内衬河段较多,人工建设特征明显,故取矩形为其断面形状。老运粮河入湖段宽度较大,且因有缓流湿地的设计,景观需求较高,故景观水深取为 1 m。考虑到沙土沉积,断面形状取为梯形,并以梯形最佳水力断面尺寸进行计算。入湖段水深 2.3 m,根据管线土方工程定额取梯形边坡系数为 1:0.7。结合各河段数据,得到河道维持景观水深生态需水量。

$$Q = bhv \quad (5)$$

$$Q = hv(mh + b) \quad (6)$$

式中: Q 为河道景观水深需水量, m^3/s ; b 为河道断面下底宽度, m ; v 为景观流速, m/s ; h 为景观水深, m ; m 为边坡系数。(5) 式用于计算小路沟及七亩沟,(6) 式用于入湖段。

2.5 因蒸发损失需水量计算

为维持河道适宜的水面面积,需要考虑河道区域降水量小于蒸发量时损失的水量。

当水面蒸发量大于降水量时,需通过从河道外引水进行生态补水以补足这部分水量。当降水量大于蒸发量时,则不需补充。现有的计算方法是根据水面面积、降水量、水面蒸发量,采用水量平衡原理

可求得相应的蒸发生态需水量。

其计算公式如下:

$$WE = A(E - P), \text{当 } E > P \text{ 时} \quad (7)$$

$$WE = 0, \text{当 } E \leq P \text{ 时} \quad (8)$$

式中: WE 为计算时段内水体的净蒸发损失量, m^3 ; A 为计算时段内水体平均水面面积, m^2 ; E 为计算时段内水体蒸发量, m ; P 为计算时段内水体降雨量, m 。

2.6 生态需水量的经济性修正

生态补水的生态环境目标和经济目标之间存在一定的冲突性和竞争性。在河道生态需水量的理论计算的基础上,本研究根据再生水购买成本、补水管道路修建成本等因素进行一定修正,以得到生态环境效益与经济效益相协调的最佳补水量。

在经济学中,效用是用来衡量消费者从一组商品和服务之中获得的幸福或者满足的尺度。在本研究中,满意度定义为决策者基于对补水的生态作用及经济成本综合考虑后评定的生态补水方案带来的效用。生态系统需水量、水质稀释净化需水量和景观需水量存在一定程度的重叠。在生态系统需水要求得到满足时,河流生态系统得以健康、可持续地运作,这意味着水质达到一定标准,河流在景观上必然呈现为和谐健康。而景观要求得到满足则意味着河流水质以及景观水深得到满足,两者均为生态系统健康和谐的必然结果。在旱季,老运粮河沿河污水管的污水收集率可达到 95%,水质稀释自净需水量较小。因此,可考虑于生态系统需水量及景观效应需水量间取一个合适的值,作为考虑经济因素后的生态需水量。

在本研究中,由于老运粮河截污较为彻底,稀释净化需水较少,补水需求主要来自于生态系统及景观需水。本研究认为,当生态补水量等于或大于生态系统需水量与景观需水量理论计算值中的较大者时,对于生态环境目标的满意度为 100%;当生态补水量小于或等于二者理论计算值中的较小值时,满意度为 0;在满意度为 0~100% 的区间内,本研究假定满意度与补水量呈线性关系,可选择 0~100% 间的生态环境目标满意度,以加入对补水成本控制的考虑。各河段生态环境目标满意度函数如下所示。

$$U(x)_{env} = \begin{cases} 0, & x \leq x_1 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 < x < x_2 \\ 1, & x \geq x_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: x 为生态补水量, m^3/d ; x_1 和 x_2 分别为生态系统需水量与景观需水量理论计算值的较小和较大值, m^3/d 。

3 结果与分析

3.1 生态系统需水量计算结果

河道生态系统需水是用以满足河流湿地生态、河口生态系统功能。由于小路沟上游东方红水库-范家营水库段运行良好,该段无需补水措施。小路沟下游各段流经城中村,淤积严重,入流污染负荷高,可通过截污清淤解决。除浅流湿地段外,小路沟暗河部分较多且河宽极窄,不存在明显景观及生态

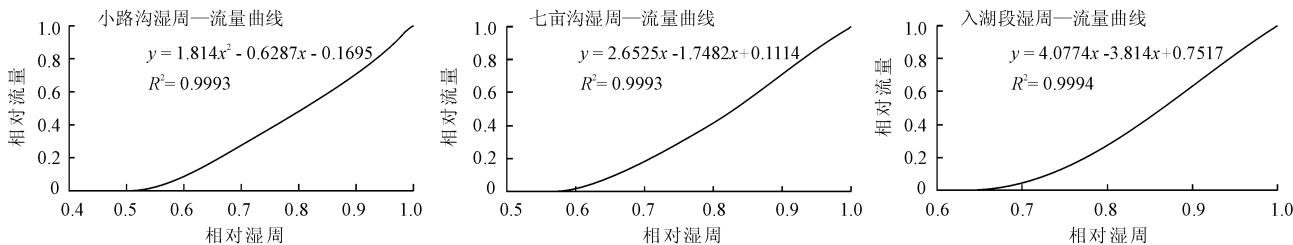


图 1 老运粮河各段湿周-流量曲线

3.2 水质稀释净化需水量计算结果

目前,昆明入滇河道基本完成截污工作,可认为截污彻底,故上文 2.3 节中 q_1 为零。外调水的水质即 C 的取值可根据老运粮河附近补水水源第三污水处理厂、第四污水处理厂和第九污水处理厂的再生水水质指标确定。各类污染物的降解系数 k 取值可参考国内外对多条河流污染物降解系数的研究成果^[14-18],见表 1。老运粮河规划水质目标参考国家科技重大专项课题《昆明市老运粮河水环境改善关键技术研究工程示范》任务合同书,见表 2。

表 1 各类污染物降解系数取值

污染物	氨氮	TN	COD	BOD	TP
降解系数/(d ⁻¹)	0.23	0.017	0.20	0.20	0.016

表 2 补水后老运粮河水质目标 mg/L

氨氮	TN	COD	BOD	TP
≤3	≤12.9	≤40	≤10	≤0.4

根据滇池北岸昆明主城区 5 大排水片区不同类型下垫面的径流系数、不同类型下垫面的面积以及昆明雨季降雨量的中间值,可得各下垫面径流。再结合各类污染物的降雨径流事件平均质量浓度(EMC, Event Mean Concentration)值以及实际进入老运粮河河道的径流量^[19-20],可得雨季由于雨水径流而额外带入老运粮河的污染物的量(见表 3)。根据上述计算,可得 Q_0 与 C_0 的值。以上数值代入公式(4),可得各河道水质稀释自净最小需水量见表 4。

需求。因此,本研究计算生态系统需水量时仅考虑七亩沟及下游入湖段需水。

经湿周-流量曲线数据趋势线 $R = 0.99$ 以上的趋势线模拟,各河段湿周-流量呈二次函数关系(图 1),用曲率法模拟得不到有效结果。从湿周法适用条件看,该方法用于较宽浅河道时更为有效,故取湿周-流量曲线上斜率为 1 的点对应的需水量为生态系统需水量。计算得七亩沟和入湖段生态系统需水量分别为 30 545 和 6 021 m³/d。

表 3 实际进入河道污染量

入河负荷量	COD/t	TN/kg	NH ₃ /kg	TP/kg
绿地	1.2	53.3	6.9	3.6
道路	16.5	357.0	85.4	43.5
屋面	1.2	146.2	52.9	7.7
三者累加总和	18.9	556.5	145.2	54.8
累加未开发用地总和	22.1	650.5	169.7	64.1

表 4 各河段河道水质稀释自净最小需水量 m³/d

小路沟	七亩沟	入湖段
264.04	3.49	4.17

3.3 河道景观水深需水量计算结果

根据小路沟、七亩沟及入湖段断面参数及景观水深要求,河道景观水深需水量计算结果如表 5。

表 5 各河段河道维持景观水深生态需水量

河段	宽度/ m	水深/ m	需水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	
小路沟	范家营水库-130号路段	1	0.3	1296
	普吉路-学府路	3	0.3	3888
	菱角塘小区-人民西路	6	0.3	7776
七亩沟	人民西路-二环西路	6	0.3	7776
	入湖段	8	1.0	33653

3.4 基于满意度修正的生态需水量计算结果

河道不同需求功能的需水量差异较大。若生态系统需水量能够满足,则水质已符合水生生物的生存要求。另一方面,若水质条件已达标准,则仅需再考虑水生生物生存对于水量的要求。因此,应在两

者之间取较大值作为二者的生态环境需水量。由上文对生态系统需水量及景观水深需水量的讨论可知,二者也应取较大值。此外,河流的水面蒸发需水量、河道渗漏需水量以及河道外植物生态需水量是相对比较独立的参数,应分别计算并相加,但由于后二者水量较小,可忽略不计。按照如上原则,取生态系统需水量、水质稀释净化需水量及河道景观水深需水量三者最大值与河流水面蒸发需水量的和,得各段生态需水量见表6。

表6 老运粮河各河段生态需水量

	河段	生态需水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
小路沟	范家营水库 - 130号路段	1505
	普吉路 - 学府路	4097
七亩沟	菱角塘小区 - 人民西路	30754
	人民西路 - 二环西路	20271
入湖段		33862

考虑到入湖段河道宽且有缓流湿地的强烈景观要求,本研究选取入湖段生态环境目标满意度为100%。小路沟有浅流湿地景观要求,但大部分河段非常窄,且流经城中村,景观需求主要集中于水质需求而非景观水深需求;七亩沟河道相对较宽,但不存在特殊河段的景观需求。因此,本研究选取小路沟及七亩沟的生态环境满意度为80%。经湿周法修正后的生态需水量再经满意度修正后的结果如表7。

表7 经满意度修正的各河段生态需水量

河段	修正后的生态	取整后的生态
	需水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	需水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
小路沟	3095	3100
七亩沟	18955	19000
入湖段	33862	34000

4 结论

本研究从老运粮河作为城市人工河道的属性出发,根据老运粮河的规划功能界定出其生态需水量的标准,基于不同河道功能,采用水力学及经验参考等方法计算老运粮河生态需水量,并以生态环境目标与经济性目标和谐统一为原则,计算得到修正后的老运粮河小路沟、七亩沟及入湖段生态需水量分别为3 095,18 955和33 862 m^3/d 。为方便补水,需水量取整后,得出小路沟、七亩沟及入湖段修正后的生态需水量分别为3 100,19 000和34 000 m^3/d 。本研究对城市人工河道生态需水量的计算及基于实际的成本-效益权衡问题进行了有意义的实践,为城市人工河

道补水工程的方案设计提供了一定参考价值。

参考文献:

- [1] 金桂琴,王培京,廖日红等.北京市温榆河生态需水量研究[J].北京水务,2009(6):14-17.
- [2] 汤奇成.塔里木盆地水资源与绿洲建设[J].干旱区资源与环境,1990,11(3):110-116.
- [3] 钱正英.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[C]//中国水利学会2001学术年会,中国:北京,2001.
- [4] Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use [J]. Ecological Applications,2008,8(3):571-579.
- [5] 姜翠玲,范晓秋.城市生态环境需水量的计算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(1):14-17.
- [6] 胡习英,陈南祥.城市生态环境需水量计算方法与应用[J].人民黄河,2006,28(2):48-50.
- [7] 崔起,于颖.河道生态需水量计算方法综述[J].东北水利水电,2008,26(1):44-47.
- [8] 李刚,赵厚仁.河流最小生态需水量计算[J].黑龙江水专学报,2004,31(1):24-25.
- [9] 吉利娜,刘苏峡,吕宏兴,等.湿周法估算河道内最小生态需水量的理论分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2):124-130.
- [10] 吉利娜,刘苏峡,王新春.湿周法估算河道内最小生态需水量——以滦河水系为例[J].地理科学进展,2010,29(3):287-291.
- [11] 吉利娜.水力学方法估算河道内基本生态需水量研究[D].西北农林科技大学,2006.
- [12] 刘苏峡,莫兴国,夏军,等.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.
- [13] 李梅,黄强,张洪波,等.基于生态水深-流速法的河段生态需水量计算方法[J].水利学报,2007,38(6):738-742.
- [14] 高玉军.东辽河污染物综合衰减系数研究[J].东北水利水电,2014,32(1):34-37.
- [15] 寇晓梅.汉江上游有机污染物 COD_{Cr} 综合衰减系数的试验确定[J].水资源保护,2005,21(5):31-33.
- [16] 郭儒,李宇斌,富国.河流中污染物衰减系数影响因素分析[J].气象与环境学报,2008,24(1):56-59.
- [17] 陈炎,孟西林,袁彩凤,等.淮河流域多闸坝河流 COD 综合衰减系数测算[J].重庆环境科学,2002,24(3):83-85.
- [18] 朱晓娟,沈万斌,高凯,等.吉林省松花江干流氨氮综合衰减系数分段研究[J].科学技术与工程,2013,13(10):2758-2761.
- [19] 黎巍,何佳,徐晓梅,等.滇池流域城市降雨径流污染负荷定量研究[J].环境监测管理与技术,2011,23(5):37-42.
- [20] 张德刚,汤利,陈永川,等.滇池流域典型城郊氮磷污染负荷定量研究[J].水土保持学报,2009,23(5):167-170.