

于森,王明玉,刘佳,等. 2013. 人工补水条件下的缺水河流生态修复综合评价方法[J]. 环境科学学报,33(2):626-634

Yu S, Wang M Y, Liu J, et al. 2013. Comprehensive assessment on ecosystem restoration of water-deficient rivers with artificial recharge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(2):626-634

人工补水条件下的缺水河流生态修复综合评价方法

于森¹, 王明玉^{1,*}, 刘佳¹, 刘培斌², 赵月芬², 杨毅²

1. 中国科学院大学, 北京 100049

2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100044

收稿日期: 2012-03-08

修回日期: 2012-06-28

录用日期: 2012-08-01

摘要: 构建了人工补水条件下的缺水河流生态修复多目标综合评价指标体系, 对生态修复中影响评价指标量化结果的因素进行了综合考虑, 提出了包含主、客观因子并反映层次关系的综合权重确定方法, 进而建立了一种人工补水条件下的缺水河流生态修复综合评价方法, 以更好地解决多目标决策中的总目标量化问题。最后, 以正在建设的永定河生态修复工程为例, 通过构建典型的生态修复情景方案, 对建立的评价指标体系进行应用, 确定各评价指标的综合权重系数, 并对构建的情景决策方案进行了综合评估, 验证本文提出的评价指标权重综合调整的必要性, 说明构建的人工补水条件下的缺水河流生态修复综合评价方法的合理性与可行性。结果表明, 所提出的评价方法不仅对人工补水条件下的河流生态修复决策具有一定的实用价值, 而且对其它类型生态修复多目标综合决策评价也具有借鉴意义。

关键词: 缺水河流; 人工补水; 生态修复; 多目标综合评价; 多层次综合权重; 永定河

文章编号: 0253-2468(2013)02-626-09

中图分类号: X32

文献标识码: A

Comprehensive assessment on ecosystem restoration of water-deficient rivers with artificial recharge

YU Sen¹, WANG Mingyu^{1,*}, LIU Jia¹, LIU Peibin², ZHAO Yuefen², YANG Yi²

1. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

2. Beijing Municipal Institute of Hydraulic Engineering Planning Design and Research, Beijing 100044

Received 8 March 2012;

received in revised form 28 June 2012;

accepted 1 August 2012

Abstract: A multi-objective comprehensive evaluation index system was established for the ecological restoration of the artificially recharged water-deficient rivers. The related impact factors were comprehensively examined, and two key factors were identified to quantify the index attributes and evaluation consequence. A multi-level and comprehensive weighting approach was proposed in determining the weight coefficients of the index attributes. A framework for scenario-based multi-objective comprehensive evaluation on the ecological restoration was then suggested which could better address the issue on quantification of the overall objective in the multi-objective decision-making. By taking the ecological restoration of the Yongding River as a case study, the established evaluation index system, the proposed approach, and the suggested framework were applied to demonstrate their rationality, feasibility, and practicability for ecological restoration of the artificially recharged water-deficient rivers. It was concluded that the proposed framework and approach had implications in multi-objective decision-making of the river ecological restoration under the conditions of artificial recharge and other pertinent applications.

Keywords: water-deficient river; artificially recharged rivers; ecological restoration; multi-objective comprehensive evaluation; multi-level and comprehensive weighting approach; Yongding River

1 引言(Introduction)

河流系统是自然界最重要的生态系统之一。河

流系统具有多种功能, 如泄洪、供水、输沙、自净、景观、航运、发电、生态功能等(倪晋仁等, 2006)。随着人类活动的加剧, 水资源过度开采, 导致许多河流

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2010CB428804);北京市科技计划项目(No. D09040903700801);国家科技重大专项课题(No. 2011ZX05060-005)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB428804), the Beijing Key Science and Technology Program (No. D09040903700801) and the Key National Science & Technology Major Project (No. 2011ZX05060-005)

作者简介: 于森(1979—),男,博士生, E-mail: yusenys@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: mwang@ucas.ac.cn

Biography: YU Sen(1979—), male, Ph. D., candidate, E-mail: yusenys@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: mwang@ucas.ac.cn

水资源极度缺乏,河道的天然属性已被改变,其功能也受到严重破坏,最终导致整个河流的生态退化,严重地制约了当地居民的生产活动.河流生态系统是一个复杂、多变、非线性的系统,对河流生态修复工作增加了难度(陈兴茹等,2011).河流生态修复的目的是使河流生态系统恢复到较为自然的状态,保证河流生态系统具有可持续性,提高生态系统价值和生物多样性(董哲仁等,2006).人工补水河流生态修复主要是充分利用城市可利用的再生水及调配其它类型水资源(如南水北调)来回灌补给到缺水的河流,满足其健康的生态多样性最低需水量,改善缺水河流生态环境,促进河流生态系统良性循环发展,遏制河流生态环境的进一步退化,建立人与自然和谐的生态环境.然而,人工补水进行河流生态修复是一项十分复杂的工程,其复杂性不仅在于系统本身,而且在于人工生态修复时必须兼顾环境、生态、经济、社会、技术、法律等方面的因素,具有多目标性特点(黄春晖等,2004).人工补水进行河流生态修复可能会给当地的地表水、地下水、地下交通设施及地下建筑等周边环境带来很大的影响.因此,合理选择生态修复评价指标,对人工补水河流生态修复进行综合评价具有重要意义,能为当地生态修复决策规划提供科学依据,并科学指导河流生态规划建设.

人工补水条件下的河流生态修复,需要从研究河流的实际情况出发.首先,解决河流“缺水”问题,满足基本的生态健康的需水,同时防止补给回灌到河道中的水对当地的地表水、地下水造成污染及水体富营养化的发生.其次,在保证不破坏当地河流原有生态系统的前提下,打造绿色景观,构建水上娱乐空间,提高河流的生态服务价值,同时结合不同河段的地质特性,采取一定的防渗减渗措施,防治地下水位抬高可能对当地的地下交通设施、地下建筑等造成一定的危害.最后,要解决河流生态修复治理费用问题,即在有限的资源条件下,合理配置修复资金,使得河流生态修复资金投入最少,生态环境修复治理效果最好,达到生态环境修复目标最佳的预期效果(Wang *et al.*, 2006).根据不同的应用环境和评价对象,许多研究者提出了不同应用目的的指标体系构架(张树军等,2008; Sven *et al.*, 2009; Weng *et al.*, 2010; Kail *et al.*, 2011),其中最典型的是压力-状态-反应(PSR)指

标框架(Walz *et al.*, 2000).然而,目前针对缺水河流生态修复建立实用的评价指标体系的研究甚少,大多评价指标体系有些可能选择的指标过多,给实际评价带来了困难,而有些过于具体不适合缺水河流生态修复综合评价.因此,本文探索性地构建了人工补水条件下的河流生态修复指标体系,且所选择的评价指标尽可能具有一定的典型性、可控性与可量化性,这有助于评价的可操作性及评价结果尽可能与实际相符.

评价指标权重系数在多目标综合评价中具有举足轻重的地位.目前,确定指标权重系数的方法可分为3大类:①主观赋权法,如Delphi法、AHP法(Saaty *et al.*, 1977)等;②客观赋权法,如熵值法(周文华等,2005)、均方差法(斯嵩等,2009)及目标规划法(樊治平等,1994)等;③综合集成赋权法,由于主观和客观赋权法各有优缺点,且二者具有一定的互补性,许多学者对综合主客观权重系数进行了研究,提出了确定权重系数的综合集成赋权法(樊治平等,1998;匡乐红等,2006;王中兴等,2006;陈伟等,2007;王书吉等,2008;吴玉秀等,2009;郑斌等,2010;姚宝珍等,2011)并在不同领域得到了应用.然而,当前对河流生态修复综合评价中评价指标的综合权重研究甚少,由于选择的评价指标的量化与确定受主、客观方面的干扰因素,如评价指标量化的准确性、决策者偏好程度及评价指标的可操作性等方面不同因素的干扰,使最终评价结果具有相应的不确定性,由此导致对河流生态环境修复决策规划产生重要的影响.单一的主观和客观赋权法由于仅考虑河流生态修复主观方面或者客观方面的信息而存在不足;现有的综合集成赋权法有些需要通过数理统计和建立数学规划模型来确定综合权重系数,其过程比较复杂不灵活;另外,现有的综合赋权法并没从影响评价结果的因素方面进行综合考虑,都是通过简单的线性加权组合主、客观方面的权重系数,这样确定得到的评价指标权重系数,可能会使得评价结果与客观实际不相符.因此,本文通过研究河流生态修复多目标评价中指标权重的多层次确定方法,并将其应用于河流生态修复综合评价中评价指标综合权重的确定,最后以北京永定河生态修复为例,应用所提出的综合评价方法对不同的情景决策方案进行综合评估,根据评估结果比选出合理的河流生态修复决策方案.

2 人工补水河流生态修复综合评价指标体系 (Comprehensive evaluation index system for ecological restoration of rivers with artificial recharge)

2.1 评价指标体系构建所遵循的原则

评价指标体系构建是否合理对缺水河流生态修复综合决策评价具有重要的影响,然而当前还没有提出针对人工补水条件下缺水河流生态修复综合评价的评价指标体系.因此,建立一套实用合理的综合评价指标体系对缺水河流生态修复综合评价与决策规划显得尤为重要.

通过人工补水对缺水的河流进行生态修复,需要结合河流的自然特性及现状环境,从时间到空间、地表到地下、自然环境到人文环境等方面进行综合考虑,同时评价指标的选择需要有助于反映河流生态修复的实际现状,客观地做出合理评价.本文参照董哲仁等(2006)提出的河流生态修复五大原则:①河流生态修复与社会经济协调发展原则;②流域尺度原则;③空间异质性的景观格局原则;④生态自我修复为主,人工适度干预为辅原则;⑤生态修复工程与资源、环境管理相结合的原则.同时也要考虑到针对已丧失生态自我修复能力的河流生态系统,可能需要更多地借助人工的干预和辅助来恢复其生态自我修复能力.

对于缺水河流通过人工补水来进行人工修复,所筛选的评价指标需要遵循如下原则:①针对性,选择的评价指标只针对严重缺水和生态恶化的河流,且需要通过人工补水来进行生态修复;②系统综合性,选择的评价指标构成的指标体系能够全面地反映出地下、地表、水质、生态等多方面的环境因素,且必须体现系统性和综合性;③可量化性,选择的评价指标能够通过数学公式或者模型模拟计算确定;④典型与主控性,选择的评价指标作为主要关键因素能够集成表达出各情景的主要状态与特征;⑤科学性,评价指标体系的建立必须以客观情况为依据,遵循河流生态系统自身的自然规律;⑥实用性,建立的评价指标体系必须对实际的修复工程具有一定的应用价值和广泛的空间适用性;⑦可操作性,建立的评价指标必须考虑用户实施、操作的难易程度等,方便用户管理操作.

2.2 评价指标体系的建立

2.2.1 评价目标的确立 本文结合当前缺水河流所面临的水环境安全、生态平衡及可持续发展、人

与自然和谐等多方面的挑战,从水环境、生态、社会经济3个方面综合考虑建立了缺水河流生态修复的评价目标,具体如下.

(1)水环境目标

针对回灌补给到河道的不同类型水资源的水质不同,可能会造成对当地地表水的污染,甚至会发生水体富营养化,同时河道入渗后可能会对当地的地下水资源造成二次污染,因此,水环境目标就是要保证地表、地下水资源的安全.

(2)生态目标

考虑到回灌补给到河道的水资源有限,为满足不同生态系统健康的基本需水量,同时能够提供绿色健康的娱乐水景观,构建健康和谐的休闲空间环境,需要充分合理利用水资源.在不破坏当地生态系统的条件下,从观赏性、适应性、安全性、易生长及方便管理等角度构建生态多样性,并保持当地生态平衡,提高当地生态环境的生态服务功能.

(3)社会经济目标

对于利用人工补水进行河流生态环境修复,需要进行科学合理的投资建设,优化当地生态修复资金的配置,使生态环境修复的效果最佳.

2.2.2 评价指标的选取 针对人工补水对缺水河流的生态修复,通过查阅大量文献资料和野外实际调研,确定所选择的评价指标要尽可能充分地表征人工补水条件下河流生态修复效果的主要方面,且所有指标的综合效果要能抓住生态修复后生态系统总状态的好坏.

对缺水河流进行人工补水,说明自然水源已无法保证生态系统健康,需要其它具有不同水质条件的水源,如再生水.因此,对于人工补水河流的生态修复首要需要考虑补给到河道的水资源对地表水体和地下水可能产生的污染风险问题.同时,人工补水给缺水河流一方面要保证一定的水面面积,构建适宜的水景观;另一方面河道中溪流与湖泊可能共存,水体富营养化风险必须考虑.因此,选择了水体富营养化、地表水水质综合污染风险指数、地下水水质综合污染风险指数等评价指标来量化水环境目标.

生态修复必须能很好地体现生态系统健康目标,人工补水河流生态修复的生态目标主要通过水面覆盖率、地下补水量及生态服务价值3个方面来体现.因为缺水,河道中水流较小甚至无水,因而水面覆盖率能反映生态修复的程度与状态;同样由于

缺水,可用水资源有限,河流生态修复需要考虑河床防渗减渗工程措施,这将导致地下补给受限,可能会带来生态环境恶化的问题,因此应包括地下补水量指标.生态目标的其它指标可通过一个综合指标——生态服务价值来表征.

社会经济目标主要通过生态修复费用来量化.为了更好地体现缺水地区人工补水生态修复的特点,突出维护管理费用,将其分为生态修复建设工

程费用与维护管理费用两个方面.因蒸发、渗漏与下泄等造成河道需要较高的补水及净化费用,属于维护管理费用,与生态修复建设工程费用相比,其在修复决策方案优化中的作用不可忽视.

据此,本文选取了具有代表性且易量化操作的评价指标,构建了人工补水河流生态修复的综合评价指标体系,具体如表 1 所示.

表 1 河流生态修复综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive assessment indicators system of river ecological restoration

	目标	评价指标	计算方法	备注
人工补水河流生态修复综合评价 指标体系	水环境目标	水体富营养化 X_1	监测与模拟	指数越小,水质污染程度越低
		地表水水质综合污染风险指数 X_2	监测与模拟	指数越小,水质污染程度越低
		地下水水质综合污染风险指数 X_3	监测与模拟	指数越小,水质污染程度越低
	生态目标	水面覆盖率 X_4	直接计算	水面覆盖率越大越好
		地下补水量 X_5 (m^3)	模型模拟计算	地下补水量越多越好
		生态服务价值 X_6 (万元)	市场价值法	生态服务价值越大越好
	社会经济目标	生态修复建设工程费用 X_7 (万元)	市场价值法	费用越少越好
		维护管理运行费用 X_8 (万元)	市场价值法	费用越少越好

评价指标的具体计算如下,①水体富营养化:采用卡尔森营养状态指数模型进行计算,水体富营养化状态分级参照湖泊营养状态分级评价标准(王明翠等,2002);②地表水水质综合污染指数:根据水质综合污染指数公式计算(周海丽等,2003),评价标准参照地表水环境质量标准(GB3838—2002);③地下水水质综合污染指数:根据地下水污染风险指数公式计算(刘长礼等,2003),评价标准参照地下水使用功能水质标准;④水面覆盖率:水面覆盖面积占河道总面积的大小(水面覆盖面积是指人工补水后河道中溪流和湖泊所构成的水面面积之和);⑤地下补水量:主要是指通过湖底、溪流和绿地(即河道除了水面,全部被绿地覆盖)入渗对地下水资源的补给量;⑥生态服务价值:按照相关的河流生态系统服务价值评估方法进行计算(张振明,2011);⑦生态修复建设工程费用 C_C (万元,下同):主要包括湖泊建设费用 $C_{\text{湖泊}}$ 、溪流建设费用 $C_{\text{溪流}}$ 、绿化面积建设费用 $C_{\text{绿化面积}}$ 、人工湿地建设费用 $C_{\text{人工湿地}}$ 、堤岸生态修复费用 $C_{\text{堤岸修复}}$ 和其它工程费用 $C_{\text{其它工程}}$ 等,根据当地的市场价值计算得到, $C_C = C_{\text{湖泊}} + C_{\text{溪流}} + C_{\text{绿化面积}} + C_{\text{人工湿地}} + C_{\text{堤岸修复}} + C_{\text{其它工程}}$;⑧维护管理费用 C_M (万元,下同):主要包括人工管理费用 $C_{\text{人工管理}}$ 、管理运营电费 $C_{\text{电费}}$ 、再生水水费 $C_{\text{再生水}}$ 、清水水费 $C_{\text{清水}}$ 和其它费用 $C_{\text{其它}}$ 等,同样根据

当地的市场价值计算得到: $C_M = C_{\text{人工管理}} + C_{\text{电费}} + C_{\text{再生水}} + C_{\text{清水}} + C_{\text{其它}}$.

3 指标权重多层次综合确定 (Determination of multi-level comprehensive index weights)

河流生态修复综合评价中指标权重多层次综合确定方法,首先要考虑评价指标对评价目标的相对重要性(不考虑其它方面的因素)权重;其次考虑评价指标数据获取的不确定性因素,如有些评价指标可以直接量化(监测或测量)得到,而有些评价指标需要通过计算机模拟获取,从数据获取的准确性和可靠性方面综合考虑.此外,不同评价指标包含的信息量的丰富程度不同,对评价结果合理确定的影响大小也不同.因此,综合考虑这些因素的影响,为使最终评价结果与客观实际相符,需要对评价指标的权重系数进行多层次综合确定.

3.1 评价指标权重综合确定框架

评价指标的综合权重通过两个阶段来确定,第一阶段通过专家判断得到各评价指标对总目标的相对权重并作为基础权重;第二阶段合理选择典型影响因素作为主控因子,在不直接改变基础权重的前提下,通过主控因子来综合调整评价指标的权重,并确定各典型主控因子在评价系统中的相对权重.最后通过线性加权来计算各评价指标的综合权

重,具体计算综合权重的框架如图 1 所示。

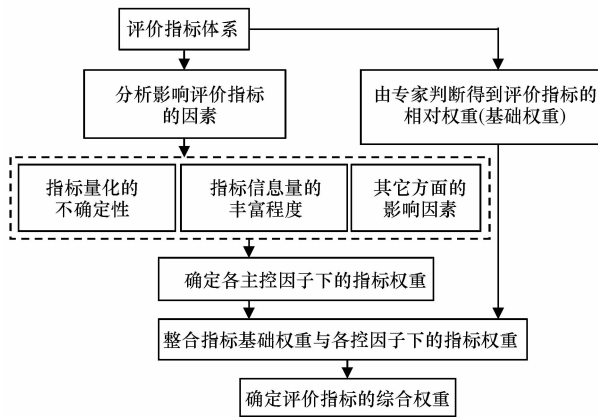


图 1 评价指标综合权重确定框架

Fig. 1 The framework of determining the comprehensive weight coefficients

3.2 评价指标综合权重计算方法

3.2.1 评价指标对目标的权重 根据评价指标对总目标的相对重要性,邀请相关领域专家评价打分,并填写各评价指标权重的判断矩阵,采用层次分析法(AHP)计算评价指标的权重,具体步骤如下:①首先确定子目标对总目标的权重 α_i ($i = 1, 2, \dots, n$),表示第*i*个子目标对总目标的权重;②然后确定评价指标对子目标的权重 k_{ij} ,表示第*i*个子目标所属的第*j*个评价指标的权重;③计算评价指标对总目标的权重 α_j ,表示第*j*个评价指标的权重,进而有: $\alpha_j = \alpha_i \cdot k_{ij}$,用 α 表示其权重集合,则 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$.

3.2.2 主控因子权重的确定 评价指标量化的准确性权重:评价指标量化的准确性主要是指针对有些评价指标是可以被准确直接量化确定,而有些评价指标是只能通过计算机模拟或者专家经验判断获取.量化的准确性程度对最终的评价结果可能产生较大的影响,因此,采用层次分析法(AHP)确定针对不同的评价指标量化准确性的权重,来降低这种不确定性程度的影响,使得评价结果更加合理.

评价指标信息量的权重:根据信息熵的原理,对于某项评价指标与其它评价指标之间的差距越大,表明该评价指标在综合评价中所起的作用越大,如果差异为零,表明该评价指标在综合评价中不起作用.因此,评价指标作用越大,赋予的权重也越大;其作用越小,权重也越小.具体计算信息量权重的步骤为:①在原始数据标准化后得到的矩阵(r_{ij}) $_{m \times n}$ 基础上,第*j*项($j = 1, 2, \dots, n$)评价指标的信

息熵值为: $e_j = -\frac{1}{\ln m} [\sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}]$, $p_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}$,其中, $0 \leq l_j \leq 1$,为使 $\ln p_{ij}$ 有意义,假定 $p_{ij} = 0$ 时, $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$;②计算第*j*项评价指标的信息量权重: $\beta_j = 1 - e_j / \sum_{j=1}^n (1 - e_j)$,用 β 表示权重集合, $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$.

3.2.3 评价指标综合权重的确定 假设第一阶段由主观判断得到评价指标对总目标的权重集合为 α (基础权重);第二阶段选择典型的主控因子:指标量化的准确性和指标信息量(在此仅选取这两个主控因子进行说明)进行对权重综合调整.由主控因子——量化的准确性进行综合调整得到的权重集合为 β ;由主控因子-指标信息量进行综合调整得到的权重集合为 γ ;同时根据不同主控因子在决策评价系统所占的重要程度,通过专家判断确定其权重,最后通过线性加权计算得到指标的综合权重集合 ω .假设评价指标重要性及两个主控因子在评价当中的权重分别为 k_1, k_2, k_3 ,进而可以得到评价指标对评价目标的综合权重,用 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ 表示,其中, ω_j 为单个评价指标的综合权重,具体计算公式如下:

$$\omega = k_1\alpha + k_2\beta + k_3\gamma =$$

$$k_1 \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} + k_2 \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + k_3 \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} k_1\alpha_1 + k_2\beta_1 + k_3\gamma_1 \\ k_1\alpha_2 + k_2\beta_2 + k_3\gamma_2 \\ \vdots \quad \dots \quad \vdots \\ k_1\alpha_n + k_2\beta_n + k_3\gamma_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

4 永定河生态修复实例研究(The case study for ecological restoration of Yongding River)

永定河是北京的母亲河,是北京西部地下水的主要补给源.随着流域内社会经济的不断发展和城市规模的不断扩大,地下水资源过度开采,导致下游河道断流、河床干涸、土壤砂化并成为北京的风沙源.日益恶化的生态环境制约着北京市的经济发展并影响人们的生活健康.因此,北京市相关部门提出对永定河进行生态修复治理,通过人工补水对缺水的城市段河道及下游河段进行生态修复,在不破坏当地原始生态环境的条件下,构建“溪流-湖泊-湿地”连通的永定河生态系统和空间景观布局,为

永定河两岸创造优美的生态水环境。

为高效循环利用城市再生水资源,将其作为永定河主要补给的水源,通过净化处理达标后与官厅水库水资源混合直接排放到永定河。然而水资源安全问题对永定河生态环境(植被、地表地下水资源)、地下交通设施、两岸居民生活健康等会产生极其重要的影响。因此,在有限资源(资金、技术等)条件,制定科学合理的永定河生态修复决策方案,对人工修复的生态环境进行科学评价,对于指导永定河生态修复工程建设,使得永定河生态修复效果最佳、修复投资费用最少、修复治理的风险将最低等目标的实现具有重要意义。

根据研发的永定河生态修复模拟评价与综合决策系统,结合永定河生态修复功能区划研究(彭涛,2010),应用系统产生了不同水量配比(再生水和清水)条件下的典型生态修复情景决策方案。研究区域取永定河城市段(三家店-卢沟桥)的14.2 km 区域进行情景构建和规划设计,打造“有水则清,无水则绿”的生态景观。此外,假设河道总面积等于水面面积与绿地面积之和,水面比例越小,则绿地比例越大(即绿地面积越大)。此处为方便说明,仅选取了具有代表性的10种情景方案(表2),对不同的情景方案进行综合评价和情景比选,来选择合理的生态修复情景方案。

表2 永定河生态修复情景方案

Table 2 Scenario schemes of ecological restoration for Yongding River

情景方案	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5/m^3	$X_6/万元$	$X_7/万元$	$X_8/(万元 \cdot a^{-1})$
P ₁	49.26	0.90	0.08	27%	308.98	1458933	112926.10	4710.78
P ₂	59.42	0.13	0.11	40%	387.38	1468949	139931.70	5972.39
P ₃	62.53	1.26	0.32	53%	430.98	1574051	152044.10	6610.78
P ₄	52.16	0.96	0.10	32%	346.87	1530274	133873.20	5073.61
P ₅	55.42	0.11	0.10	35%	355.62	1530274	135873.30	5592.41
P ₆	61.93	1.18	0.28	44%	412.12	1558949	140599.80	6230.50
P ₇	58.98	0.12	0.11	38%	369.21	1554013	138828.00	5922.19
P ₈	60.75	0.15	0.13	44%	402.56	1479077	139992.30	6013.75
P ₉	65.86	1.30	0.35	53%	440.56	1589077	155327.10	6733.75
P ₁₀	50.49	1.00	0.09	30%	315.54	1523915	113432.80	4722.58

4.1 确定评价指标的综合权重

结合永定河现状及构建的综合评价指标体系,分析了对评价指标具有关键影响的典型主控因子;评价指标量化的准确性和评价指标的信息量,对于这两个主控因子按照本文计算综合权重的方法来

确定相应权重。

4.1.1 评价指标对总目标的权重 根据永定河生态修复目标,确定了评价指标针对各子目标的重要性,由层次分析法(AHP)计算得到的各评价指标的权重作为基础权重,结果如表3所示。

表3 各评价指标的权重

Table 3 The weights of the relative importance

子目标	子目标权重	指标	指标对子目标权重	一致性检验	指标对总目标权重
水环境目标	0.25	水体富营养化 X_1	0.3333	CR = 0.0158	0.0833
		地表水水质综合污染风险指数 X_2	0.3333		
		地下水水质综合污染风险指数 X_3	0.3333		
生态目标	0.50	水面覆盖率 X_4	0.4616	CR = 0.0008	0.2308
		地下补水量 X_5	0.0769		
		生态服务价值 X_6	0.4615		
社会经济目标	0.25	生态修复建设工程费用 X_7	0.3333	CR = 0.0208	0.0833
		维护管理运行费用 X_8	0.6667		

注:子目标权重的一致性检验结果为 CR = 0.0942。

4.1.2 指标量化的准确性权重 对于给定的10个评价指标,在具体的情景中需要获得相应的指标值.因获取方法及量化难易程度不同,其结果的不确定性可能相差较大.如地下水污染风险指数与地下水补给量的变化值通常由数值模型模拟计算获

得,而模型概化与模型参数具有较大的不确定性,因此,两个评价指标的准确性权重应较小.通过对永定河人工补水生态修复工程中各指标量化的相对难易程度与潜在误差大小进行分析,通过层次分析法(AHP)判断得到其权重(表4).

表4 评价指标量化的准确性权重

Table 4 The weight coefficients of quantitative accuracy

评价指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	一致性检验
准确性权重	0.073	0.0779	0.0199	0.1379	0.0285	0.1219	0.2104	0.3285	CR=0.0889

4.1.3 指标信息量权重 通过信息熵对永定河生态修复各评价指标的差异程度及有效信息量的丰富程度进行分析,采用熵值法来确定各评价指标的熵权,即为指标信息量权重.评价指标信息的效用

值越高,评价的重要性也越大,则其权重也越大,反之亦然.评价指标的信息量权重确定结果如表5所示.

表5 各评价指标的信息量权重

Table 5 The weight coefficients of information

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	一致性检验
信息量权重	0.1505	0.1563	0.0921	0.1846	0.0611	0.1218	0.1114	0.1222	CR=0.0046

4.1.3 指标的重要性、量化的准确性、信息量三者之间的重要程度 通过综合分析,认为评价指标相对总目标的重要性、指标量化的准确性、指标信息量三者的重要程度为:重要性 > 量化的准确性 > 信息量(其中“>”表示优于).因此,通过层次分析法(AHP)判断得到指标的重要性、量化的准确性、信

息量的权重系数分别为0.7014、0.2132、0.0853(CR=0.0463 < 0.1).

4.1.4 综合权重 通过对评价指标的基础权重(相对重要性)和主控因子(指标量化的准确性和指标信息量)权重的综合确定,应用综合评价指标计算公式(1)确定各评价指标的综合权重(表6).

表6 综合权重系数

Table 6 Comprehensive weight coefficients

评价指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	一致性检验
综合权重	0.0967	0.0984	0.0798	0.2130	0.0424	0.1982	0.1001	0.1710	CI=0.0103

4.2 方法有效性验证及方案评估

为验证本文提出的河流生态修复评价指标权重多层次确定方法的合理性和可行性,把原始样本方案表2作为误差方案样本.根据量化准确性权重相对大小,设定相应样本误差范围大小,在此基础上构建了一个标准样本方案表7(假设已知误差样本与标准样本对应指标之间的误差范围在0~45%之间),来验证评价指标权重调整的合理性.对于标准样本方案直接应用层次分析法(AHP)判断得到的权重系数认为是合理的且不需要调整,通过计算得到方案的最终评价排序结果.对于误差样本方案用调整前的权重系数(直接用标准样本的权重系数)与调整后的综合权重系数分别计算各方案的评价

结果.最后分别计算误差样本评价指标权重系数调整前后各方案与标准样本中相应方案的排名差距大小.差距越小,说明评价结果与标准样本评价结果越接近;反之亦然.3种不同情况下的方案排序结果如表8所示.

从表8可以看出,误差样本在权重调整后计算得到的不同方案的排名次序B与对应标准方案中排名次序A的平均差距(B-A)是1.3,而误差样本调整前排名次序C与对应标准方案中排名次序A的平均差距(C-A)是2.6,由此说明了误差样本在权重调整后排名次序B与对应标准方案中排名次序A的平均差距总体小于误差样本在调整前排名次序C与对应标准方案中排名次序A

的平均差距,充分证明了本文提出的多层次综合权重方法确定评价指标权重的优势,且在很大程度上提高了评价结果的准确性.同时,取排序前5名的情景方案进一步比较可以看出,排序前5名情景方案在权重调整后排名次序B与对应标准方案中排名次序A的平均差距(B-A)是1.0,而前5名情景

方案在调整前排名次序C与对应标准方案中排名次序A的平均差距(C-A)是3.0,也充分验证了评价指标权重综合调整的必要性及调整后的评价结果的合理性.说明通过单一的直接用主观得到的权重系数进行评价,其评价结果与实际结果之间可能存在相当大的偏差.

表7 标准样本方案

Table 7 The standard samples

情景方案	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5/m^3	$X_6/\text{万元}$	$X_7/\text{万元}$	$X_8/(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$
P ₁	30.28	0.61	0.04	23%	200.84	1167146.40	107279.80	4210.78
P ₂	39.81	0.09	0.06	33%	240.18	1131090.73	128737.16	5793.22
P ₃	40.64	0.88	0.18	42%	258.59	1180538.25	136839.69	6280.24
P ₄	36.51	0.72	0.06	27%	225.47	1224219.20	127179.54	5073.61
P ₅	37.13	0.08	0.06	29%	220.48	1178310.98	125003.44	5424.64
P ₆	40.25	0.83	0.15	35%	247.27	1169211.75	126539.82	5918.98
P ₇	41.29	0.09	0.07	32%	239.99	1243210.40	131886.60	5922.19
P ₈	40.70	0.11	0.07	37%	249.59	1138889.29	128792.92	5833.34
P ₉	42.81	0.91	0.19	42%	264.34	1191807.75	139794.39	6397.06
P ₁₀	33.84	0.75	0.05	26%	205.10	1121932.00	112511.16	4722.58

表8 方案排序对比

Table 8 Comparison of ranking differences

方案排名	A	B	平均差距 (B-A)	C	平均差距 (C-A)
1	P ₁	P ₁₀	1	P ₅	3
2	P ₁₀	P ₁	1	P ₂	4
3	P ₄	P ₅	2	P ₇	2
4	P ₅	P ₄	1	P ₁₀	2
5	P ₇	P ₇	0	P ₁	4
6	P ₂	P ₆	2	P ₆	2
7	P ₈	P ₃	2	P ₄	4
8	P ₆	P ₂	2	P ₉	2
9	P ₃	P ₈	2	P ₈	2
10	P ₉	P ₉	0	P ₃	1
平均差距			1.3		2.6

注:A为标准样本方案,其权重不需要调整,仅用AHP方法判断;B为系统产生情景方案样本,权重需要调整,权重用本文提出的多层次综合权重方法判断;C为系统产生情景方案样本,权重不作调整,仅用AHP方法判断.

与此同时,根据综合评价的结果,得到表2中情景方案排序结果如下:P₁₀ > P₁ > P₅ > P₄ > P₇ > P₆ > P₃ > P₂ > P₈ > P₉ (“>”表示优于).

结合永定河当前修复的现状(中段14.2 km),永定河当前构建的实际水面面积约占40%,投资建设费用约14.2亿元,已修复的区段重点以生态修复为目标,绿化为重点,水面覆盖面积和绿化面积相

对越大越好.取排名第1的情景方案P₁₀与实际情况进行对比,选出的P₁₀情景方案所构建的水面面积为30%,略小于实际水面面积,但总投资11.5亿元,也略小于实际投资.而该情景绿化面积占70%,表明除水面外其余则为绿地,这也与目前已修复的永定河中段“有水则清,无水则绿”的生态景观一致.另外,从水环境、生态修复投资建设和维护管理费用等方面,P₁₀情景方案其综合评价结果优于其它方案.由此进一步说明了本文所提出的综合评价方法的可靠性、合理性和可行性.

5 结论(Conclusions)

1) 本文建立了科学的人工补水条件下的缺水河流生态修复评价指标体系,所选指标典型且可量化,体现出较强的综合性与系统性,为解决缺水河流生态修复多目标综合评价问题提供了重要基础.

2) 所提出的指标权重综合确定方法较全面地考虑了影响指标权重的不同方面,合理地突出具有关键影响的两个权重调控因子,正确地整合了主、客观因子并反映出层次关系,以其为核心所建立的人工补水条件下的缺水河流生态修复综合评价方法能更好地解决多目标决策中的总目标量化问题.

3) 通过永定河生态修复工程案例应用分析,实

证了本文提出的评价指标权重综合调整的必要性,体现出所构建的河流生态修复多目标综合评价指标体系的适宜性,进一步说明提出的缺水河流生态修复综合评价方法的实用性与可操作性。同时,所提出的综合评价方法及其文中所展现的具体应用对其它类型生态修复决策中的多目标综合评价具有借鉴意义。

责任作者简介:王明玉(1961—),男,博士,教授,博导,主要从事地下水环境模拟与污染控制及环境优化管理。E-mail: mwang@ucas.ac.cn.

参考文献 (References):

- 陈伟,夏建华. 2007. 综合主-客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实践与认识, 37 (1): 17-22
- 陈兴茹. 2011. 国内外河流生态修复相关研究进展[J]. 水生态学杂志, 32 (5): 122-128
- 董哲仁. 2006. 试论河流生态修复规划的原则[J]. 中国水利, (13): 11-13
- 樊治平. 1994. 多属性决策的一种新方法[J]. 系统工程, 12 (1): 15-17
- 樊治平,张全. 1998. 多属性决策中权重确定的一种集成方法[J]. 管理科学学报, 1 (3): 50-53
- 黄春晖,高峻. 2004. 生态构建-恢复生态学的新视点[J]. 地理与地理信息科学, 20 (4): 52-55
- 匡乐红,徐林荣,刘宝琛. 2006. 组合赋权法确定地质灾害危险性评价指标权重[J]. 地下空间与工程学报, 2 (6): 1063-1075
- Kail J, Wolter C. 2011. Analysis and evaluation of large-scale river restoration planning in Germany to better link river research and management [J]. River Research and Applications, 27 (8): 985-999
- 刘长礼,张云,张凤娥,等. 2003. 北京某垃圾处置场对地下水的污染[J]. 地质通报(7): 531-535
- 倪晋仁,刘元元. 2006. 论河流生态修复[J]. 水利学报, 37 (9): 1029-1037
- 彭涛,吴建寨,姜广辉. 2010. 永定河河道修复生态功能区划研究[J]. 中国人口·资源与环境, 20 (9): 134-139
- Saaty T L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 15 (3): 234-281
- Sven L, Jürgen B, Neil G, et al. 2009. Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: Application of the Elbe DSS [J]. Environmental Modelling & Software, 24: 26-43
- 斯嵩,杜关记. 2009. 基于均方差-模糊综合评判复合模型的地下水水质评价[J]. 地下水, 31 (1): 16-47
- Weng S Q, Huang G H. 2010. An integrated scenario-based multi-criteria decision support system for water resources management and planning-A case study in the Haihe River Basin [J]. Expert Systems with Applications, 37: 8242-8254
- Walz R. 2000. Development of environmental indicator systems experiences from Germany [J]. Environmental Management, 25 (6): 613-623
- Wang M Y. 2006. Optimal environmental management strategy and implementation for groundwater contamination prevention and restoration [J]. Environmental Management, 37 (4): 553-566
- 王书吉,费良军,雷雁斌,等. 2008. 综合集成赋权法在灌区节水改造效益评价中的应用[J]. 农业工程学报, 24 (12): 48-51
- 王中兴,李桥兴. 2006. 依据主-客观权重集成最终权重的一种方法[J]. 应用数学与计算数学学报, 20 (1): 87-92
- 王明翠,刘雪芹,张建辉. 2002. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, (5): 47-49
- 吴玉秀,苏海涛,艾合买提江·肉孜. 2009. 综合集成赋权法在节水灌溉工程方案优选中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 20 (3): 105-107
- 姚宝珍,杨成永,沈飞,等. 2011. 基于综合集成赋权法的公交发车频率优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 11 (2): 124-129
- 张树军,赵峰,罗陶露,等. 2008. 生态补水综合效益评价指标体系建立[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 38 (5): 813-819
- 张振明,刘俊国,申碧峰. 2011. 永定河(北京段)河流生态系统服务价值评估[J]. 环境科学学报, 31 (9): 1851-1857
- 郑斌,唐德善,史兹国. 2010. 基于综合集成赋权法的河道整治方案优选研究[J]. 水电能源科学, 28 (4): 113-115
- 周文华,王如松. 2005. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价[J]. 生态学报, 25 (12): 3244-3251
- 周海丽,史培军,徐小黎. 2003. 深圳城市化过程与水环境质量变化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 39(2): 273-279