

DOI: 10.5846/stxb201908121685

王明净, 杜展鹏, 段仲昭, 严长安, 高伟, 刘嫦娥. 河湖生态系统生态用水优化研究——以滇池流域为例. 生态学报, 2021, 41(4): 1341-1348.

Wang M J, Du Z P, Duan Z Z, Yan C A, Gao W, Liu C E. Estimating the eco-environmental water demand of a river and lake coupled ecosystem: a case study of Lake Dianchi Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1341-1348.

河湖生态系统生态用水优化研究 ——以滇池流域为例

王明净¹, 杜展鹏¹, 段仲昭¹, 严长安², 高伟^{1,*}, 刘嫦娥¹

¹ 云南大学生态与环境学院, 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091

² 昆明市生态环境科学研究院, 昆明 650032

摘要:生态需水是河流与湖泊生态系统健康的重要基础。湖泊流域的河流与湖泊生态系统之间存在密切的水量联系, 目前对流域内生态用水的研究多为单一生态系统生态需水简单相加, 忽略了河流和湖泊之间复杂的水量联系。基于河湖复合生态系统之间的水量联系构建了河湖生态系统生态用水优化模型, 并以滇池为例分析了河湖生态系统生态用水规律。结果表明: 湖泊流域中单一河流或湖泊生态需水计算结果不能满足复合生态系统的生态用水要求, 需要综合考虑河流和湖泊之间的水量联系; 在当前水质状况下, 牛栏江每年的调水量不能满足滇池流域的生态用水要求; 滇池流域水体污染对流域内生态用水影响较大, 随着水体污染程度的下降, 流域生态用水量和调水量呈指数下降, 河流生态用水呈线性下降。

关键词:生态用水; 流域模型; 月保证率法; 水量平衡; 优化模型

Estimating the eco-environmental water demand of a river and lake coupled ecosystem: a case study of Lake Dianchi Basin

WANG Mingjing¹, DU Zhanpeng¹, DUAN Zhongzhao¹, YAN Chang'an², GAO Wei^{1,*}, LIU Chang'e¹

¹ School of Ecology and Environmental Science & Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming 650091, China

² Kunming Institute of Ecology Environment Science, Kunming 650032, China

Abstract: The environmental flow requirement is very important for the health of river and lake ecosystems. The sum of the environmental flow of river and the lake is often considered as the eco-environmental water demand of a river and lake coupled ecosystem in most studies. However, there may be problematic because the connection between the river and lake is ignored. Based on the water volume linkage between river and lake ecosystems, this paper constructed a watershed optimization model for a river and lake coupled ecosystem, and analyzed the eco-environmental water demand rules of watershed by taking Lake Dianchi as an example. The results showed that the environmental flow requirement of a single river or a lake could not meet the eco-environmental water demand of the lake basin, and the connection between rivers and lakes needed to be comprehensively considered. Under the current water quality conditions, the annual water transfer volume from Niulanjiang River cannot meet the eco-environmental water demand of Lake Dianchi Basin. The water pollution of Lake Dianchi Basin has a great impact on the eco-environmental water demand of river and lake coupled ecosystem in the basin. With the decrease of water pollution degree, the eco-environmental water demand for the whole system and water diversion in the basin decreases exponentially, and water use for river ecosystem decreases linearly.

基金项目:国家自然科学基金项目(41701631); 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室开放基金(2018DG005); 云南省重点研究计划(2018BC002)

收稿日期: 2019-08-12; 网络出版日期: 2020-12-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaowei@ynu.edu.cn

Key Words: eco-environmental water demand; watershed model; improved monthly guaranteed frequency method; water balance; optimization model

河流和湖泊为人类的生存和发展提供了丰富的生态系统服务,承担着流域内的气候调节、污染控制、航运和调蓄等功能^[1]。随着经济社会的发展,不合理的水资源利用方式,导致河流、湖泊出现断流、枯竭、水体污染等问题^[2-4],污染排放、过度取水等行为导致了湖泊流域产生资源型或水质型的缺水^[5-6]。很多学者认为维持河、湖生态需水是保证河湖流域生态系统健康和水资源可持续利用的关键^[7-8]。从 20 世纪中期开始,随着大量的水资源开发利用,美国、欧洲等一些国家开始关注鱼类的生境问题,由此提出了河流最小环境(或生态)流量的概念及其计算方法^[9-11]。随着水环境研究的深入和发展,“环境需水”、“生态环境需水”、“生态耗水”等概念被相继提出,但目前对此尚未有明确的区分和定义。广义上的生态需水是指满足某一生态系统维持其基本功能所需要的水量。目前对于生态需水的研究有很多,但都仅针对单一生态系统类型^[7, 12]。然而,对于湖泊流域,流域内湖泊和河流之间的水文情势是相互影响的^[13-14],有学者认为流域内不同生态系统间有其特定的水量联系,在研究中不应该将其割裂开来^[15]。一些学者提出对复合生态系统的生态用水的研究应作整体评价^[16-17],但目前对流域内生态用水的研究仍以单一生态系统类型计算后再进行简单加和为主^[16, 18-19],没有针对河湖生态系统整体进行的研究。对河湖生态系统内单一生态系统生态需水的简单加和会造成部分生态需水重复计算,难以真实地反映流域的生态需水状况。

滇池流域的生态用水研究以湿地植物生态需水研究较多^[20-22],湿地植物生态需水是湿地生态用水的一部分,通过经验公式等可以进一步推算湿地生态用水;也有学者基于生态环境用水对滇池流域水资源配置进行分析^[23-24];目前对于滇池流域各子流域的生态需水的研究较少,尚无对整个流域生态用水评估的研究。但是滇池流域是一个典型的河湖复合生态系统,滇池和入湖河流形成了复杂的河湖连通的湿地系统。近些年来由于气候变化及社会经济发展压力,滇池的水污染和水资源短缺较为严重,外流域调水已经成为维持滇池流域水量平衡和改善水环境的重要措施^[24-25]。对流域生态用水的评估和优化对维持流域生态系统健康和完整性以及水资源合理配置具有现实意义。

本研究基于水量平衡原理,综合考虑湖泊和河流之间的水量联系,在牛栏江调水和河湖污染状况的约束下,对包括滇池和入滇河流的整个河湖生态系统用水进行优化,对河湖生态用水规律进行探索,并为滇池流域水环境保护和水资源合理配置提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滇池属于金沙江水系,为断陷构造湖,流域内有 35 条大小不一的河流呈向心状汇入滇池。根据《2017 年度昆明市环境状况公报》,2017 年滇池总体水质仍为 V 类,35 条入滇河流中,由于水系调整和截污改造工程有 4 条河道断流,25 个入湖断面水质达标,还有 6 个断面水质未达标;流域人均水资源量不足 200m³,为极度缺水地区,入湖河流断流十分严重。流域内湖泊和河流之间的水文情势相互影响,水量联系复杂,流域内河湖生态系统的生态用水评估对维持流域生态系统健康和完整性以及水资源开发利用具有现实意义。

1.2 河湖生态系统生态用水模型

1.2.1 河流和湖泊最小生态需水

(1) 湖泊最小生态需水

根据不同的研究目的,湖泊生态需水的计算方法有最低水位法、保证率法、水量平衡法等^[7, 26]。其中,水量平衡法原理清晰,应用较多,本研究采用水量平衡法对滇池生态需水进行估算。根据湖泊水量平衡,湖泊的最小生态需水可以表示为:

$$LEW_i = F_i \times E_i - F_i \times P_i + K \times I \times D_i \quad (1)$$

$$F_i \geq F_{\min} \quad (2)$$

式中, LEW_i 为湖区各月最小生态需水 (m^3); F_i 为水面面积 (m^2); E_i 为水面蒸发量 (m/s); P_i 为湖面降水量 (m/s); K 为渗透系数 (无量纲); I_i 为湖泊渗流坡度 (无量纲); $F_{\min}$ 为最低生态水位相应的湖面面积 (m^2); D_i 为湖泊渗漏面积 (m^2); 下标 i 为月份, $i=1, 2, 3, \dots, 12$ 。

(2) 河流最小生态需水

河流生态需水的估算可以大致分为水文学法、水力学法、整体分析法和栖息地法 4 种^[27]。其中月保证率法能够体现生态需水的年内变化, 本研究采用月保证率法对入滇河流的逐月生态需水进行估算。月保证率法是根据系列水文资料, 将某个累积频率对应的月天然径流量作为生态流量。一般频率可取 90% 或 95%, 也可根据实际情况进行调整。该方法能更好的反应径流的年内变化, 但需要至少 20 年的连续水文数据^[28]。

月保证率法需要连续水文数据进行计算, 但滇池各个流域并不是都有历史实测流量, 且实测流量不能反映天然径流情况。因此本研究采用 HBV 流域模型对河流天然径流进行模拟。首先以牧羊河子流域为参数率定单元, 使用中和水文站 (图 1) 1999—2015 年的实测流量数据及同期的日降雨、日平均气温和潜在蒸发量数据率定模型获得参数, 再对全流域 1988—2015 的天然径流量进行模拟, 并采用 90% 的保证率计算生态需水。

HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 模型^[29]是瑞典气象水文局于 1976 年开发的半分布式水文模拟模型, 是针对瑞典气候区开发的水文预报模型。该模型目前已被应用于位于不同气候区的 40 多个国家和地区的洪水预报、水资源评估、气候变化的水文响应和无资料区水文研究等多领域研究^[30-32]。该模型结构简单, 操作便捷, 输入数据为日降雨、日平均气温和潜在蒸发量, 输出为日流量。该模型对输入数据的要求不高, 即使输入数据质量不高模拟效果也能达到基本要求^[33], 对于基础数据薄弱的地区也有较好的适用性。

1.2.2 河湖生态系统生态用水优化模型

由于河流和湖泊之间复杂的水量联系, 不能将河流和湖泊生态需水简单相加作为河湖生态系统生态用水。为了维持河湖生态系统健康, 除了水量需求外, 相应的水质也应该纳入考虑。基于以上考虑, 本研究采用优化模型对河湖生态系统生态用水进行研究。优化模型是用于在有限的资源条件下寻找所关注的问题的最优解决方案的方法。河湖生态系统生态用水最小是本研究的主要研究目标, 同时河流和湖泊生态需水及其水量联系、河流和湖泊的水质等需要满足一定的条件, 用优化模型进行求解可得到满足所设定条件的最优生态用水量。

根据水量平衡原理, 湖泊的陆域水量补给主要来自入湖河流和外流域调水, 基于水量平衡计算的湖泊最小生态需水应能满足湖面蒸发和渗漏需求。当湖泊最小生态需水量小于河流最小生态需水量时, 河流和湖泊的生态需水量都能得到保证; 反之, 若河流的最小生态需水量小于湖泊最小生态需水量, 则需要提高入湖水量。

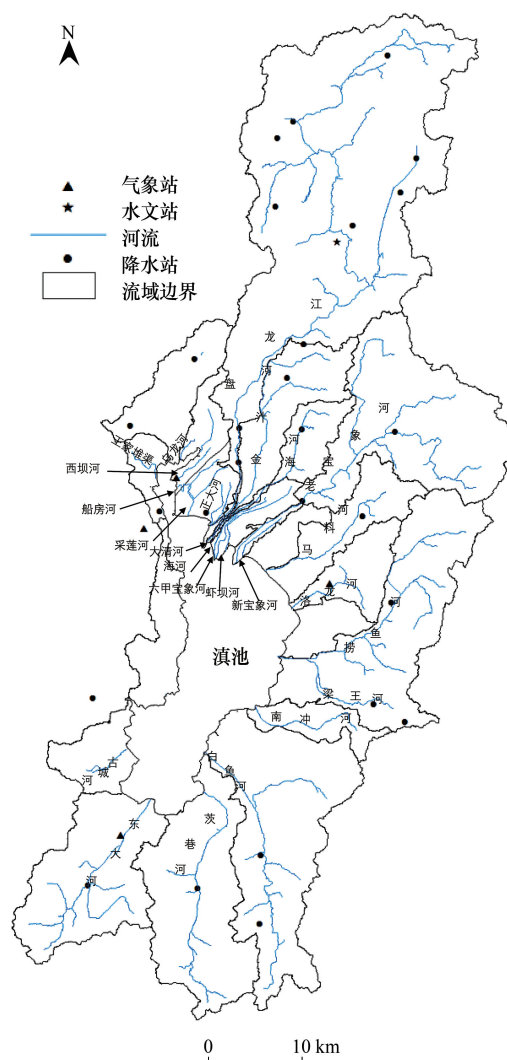


图 1 滇池流域水系及气象水文站点

Fig.1 The water system of Lake Dianchi Basin and Meteorological hydrological stations

(通过提高河流生态用水或外流域调水)才能满足湖泊的最小生态需水量。基于此,设计如下河湖复合生态系统的生态用水优化模型。

(1) 优化目标

考虑到滇池流域水资源十分短缺,从用水效益角度出发,将优化目标定为生态用水总量最小,保证经济社会用水效益的最大化:

$$\min Y_i = \sum_j (RW_{ij} + TW_{ij}) \quad (3)$$

式中, RW_{ij} 为河流生态用水量(m^3/s); TW_{ij} 为外流域调水量(m^3/s);下标 i 为月份, $i=1,2,3,\dots,12$;下标 j 为河流标号, $j=1,2,3,\dots,16$ 。

(2) 约束条件

水量约束条件:优化得到的河流和湖泊的生态用水量应该要满足相应的河流和湖泊的最小生态需水量,同时河流的生态用水量应不超过该河流的天然径流量:

$$REW_{ij} \leq RW_{ij} + TW_{ij} \quad (4)$$

$$RW_{ij} \leq RNW_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_j (RW_{ij} + TW_{ij}) \geq LEW_i \quad (6)$$

$$TW_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

式中, REW_{ij} 为河流生态需水量(m^3/s); RNW_{ij} 为河流天然径流量(m^3/s); LEW_i 为湖泊最小生态需水量(m^3/s),其他符号同上。

水质约束条件:优化得到的生态用水量要能满足现阶段的水质目标。河流污染物浓度采用零维模型进行估算;湖泊中 COD 浓度采用零维模型估算, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 浓度采用狄龙公式进行估算。

$$\frac{(RP_{ijn} + TW_{ij} \times TC_n \times 2592) / ((RW_{ij} + TW_{ij}) \times 2592)}{1 + RK_n \times RL_j / (86400 \times 0.37 \times (RW_{ij} + TW_{ij})^{0.25})} \leq RC_n \quad (8)$$

$$\frac{\sum_j (RMC_{ij} \times RW_{ij} + TW_{ij} \times TC_n)}{\sum_j (RW_{ij} + TW_{ij}) - LEW_i + LKC / 2592000 \times V} \leq LCC \quad (9)$$

$$\frac{(1 - R_k) \times \sum_j (RM_{ijk} \times (RW_{ij} + TW_{ij})) / S}{h \times (\sum_j (RW_{ij} + TW_{ij}) - LEW_i) / V} \leq LC_k \quad (10)$$

式中, RP_{ijn} 为河流中的各污染物通量(kg); TC_n 为牛栏江调水水质(mg/L); RC_n 为污染物在河流中的达标水质浓度(mg/L); RL_j 为河段的纵向距离(m); RK_n 为河流中污染物综合衰减系数($1/\text{d}$);下标 n 代表污染物类型,本研究中选择 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP; RMC_{ij} 为河流中 COD 浓度(mg/L); V 为湖泊水体体积(m^3); LKC 为湖泊中 COD 的降解系数($1/\text{月}$); LCC 为 COD 在湖泊中的达标水质浓度(mg/L); R_k 为污染物在湖泊中的滞留系数($1/\text{月}$); RM_{ijk} 为河流中的污染物浓度(mg/L); S 为湖泊水面面积(m^2); h 为湖泊平均深度(m); LC_k 为污染物在湖泊中的达标水质浓度(mg/L);下标 k 代表污染物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP;其他参数同上。

1.2.3 模型参数估计

河、湖污染物综合衰减系数及滞留系数 RK_n 、 LKC 和 R_k 参考《全国水环境容量核定技术指南》;滇池水深 h 、面积 S 及体积 V 参考《云南省滇池保护条例》;水质标准 RC_n 、 LCC 、 LC_k 及牛栏江水质 TC_n 参考《云南省地表水水环境功能区划》确定; RP_{ijn} 河流中污染物浓度数据和水量数据分别来自昆明市环境监测中心和云南省水文水资源局。

2 结果与讨论

2.1 河流和湖泊生态需水

根据滇池流域的 1988—2015 年气象水文资料,采用 HBV 流域模型模拟各条入湖河流的天然径流量。以

牧羊河子流域 1999—2007 的实测流量数据进行模型校准,再用 2008—2015 年的数据进行模型验证。在流量过程线图中(图 2),无论是校准期还是验证期,牧羊河子流域的模拟值和实测值对比,流量过程线基本一致,表明该模型可以较好的模拟出河流日径流过程。

从表 1 可以看出校准期和验证期模拟值和实测值之间的相关系数均在 0.6 以上,校准期纳什系数高达 0.826,验证期纳什系数大于 0.5,相对误差均在 15% 范围内,表明 HBV 模型在牧羊河子流域的模拟效果较好,用该模型对滇池流域其他子流域进行日径流量的模拟是可靠的。

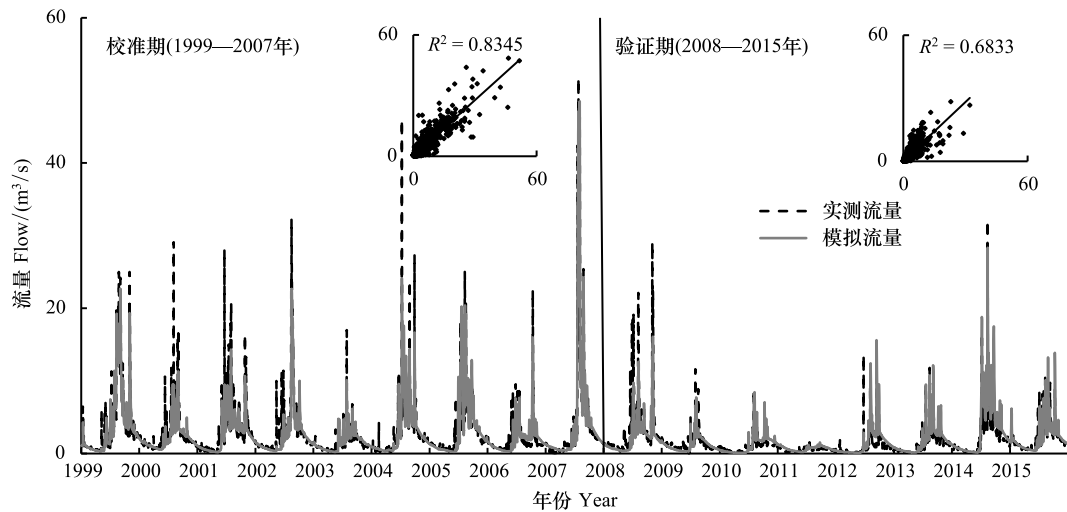


图 2 HBV 模型在牧羊河子流域模拟流量

Fig. 2 Simulation discharge of HBV modeling in the Muyang sub-basin

HBV: 半分布式水文模拟模型

表 1 HBV 模型在牧羊河子流域模拟效果

Table 1 Simulation results of HBV modeling in the Muyang sub-basin

时段 Period	纳什系数 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE)	拟合优度 Goodness of fit (R^2)	相对误差 Relative error/%
校准期 Calibration	0.826	0.834	-0.32
验证期 Verification	0.586	0.683	12.19

HBV: 半分布式水文模拟模型

由式(1)计算滇池生态需水,由于天然湖泊较少有渗漏的观测^[34],本研究忽略了渗漏需水部分,计算得到滇池年生态需水量约为 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$;由 HBV 流域模型模拟得到的各子流域的流量,用月保证率法分别计算各河流生态需水。滇池入湖河流的生态需水总量为 $4.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中盘龙江子流域年生态需水量最高,约为 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,占整个流域总入湖量的 25.8%(图 3)。

滇池流域干旱季分明,且降水年内分布差异较大,导致整个滇池流域的生态需水年内变化较大(图 3),盘龙江子流域 8 月份生态流量高达 $11.16 \text{ m}^3/\text{s}$,4 月份生态流量为 $0.41 \text{ m}^3/\text{s}$,仅为 8 月份的 3.7%。由于滇池流域降水空间分布不均,降水多集中在流域中部(滇池东北方向)^[35],导致各子流域生态需水量差异较大,盘龙江子流域年生态需水量高达 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,而六甲宝象河流域年生态需水量仅 $516 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.2 河湖生态系统生态用水

基于河湖生态系统生态用水优化模型,得到滇池流域河湖生态用水量(图 4)。由图可知,河湖生态系统生态用水、河流生态需水和湖泊生态需水 3 者差异较大。从河流与湖泊生态需水关系看,不同月份两者相对大小呈现反转特征。1 月到 5 月,河流生态需水低于湖泊生态需水,因此仅考虑河流最小生态需水量显然无

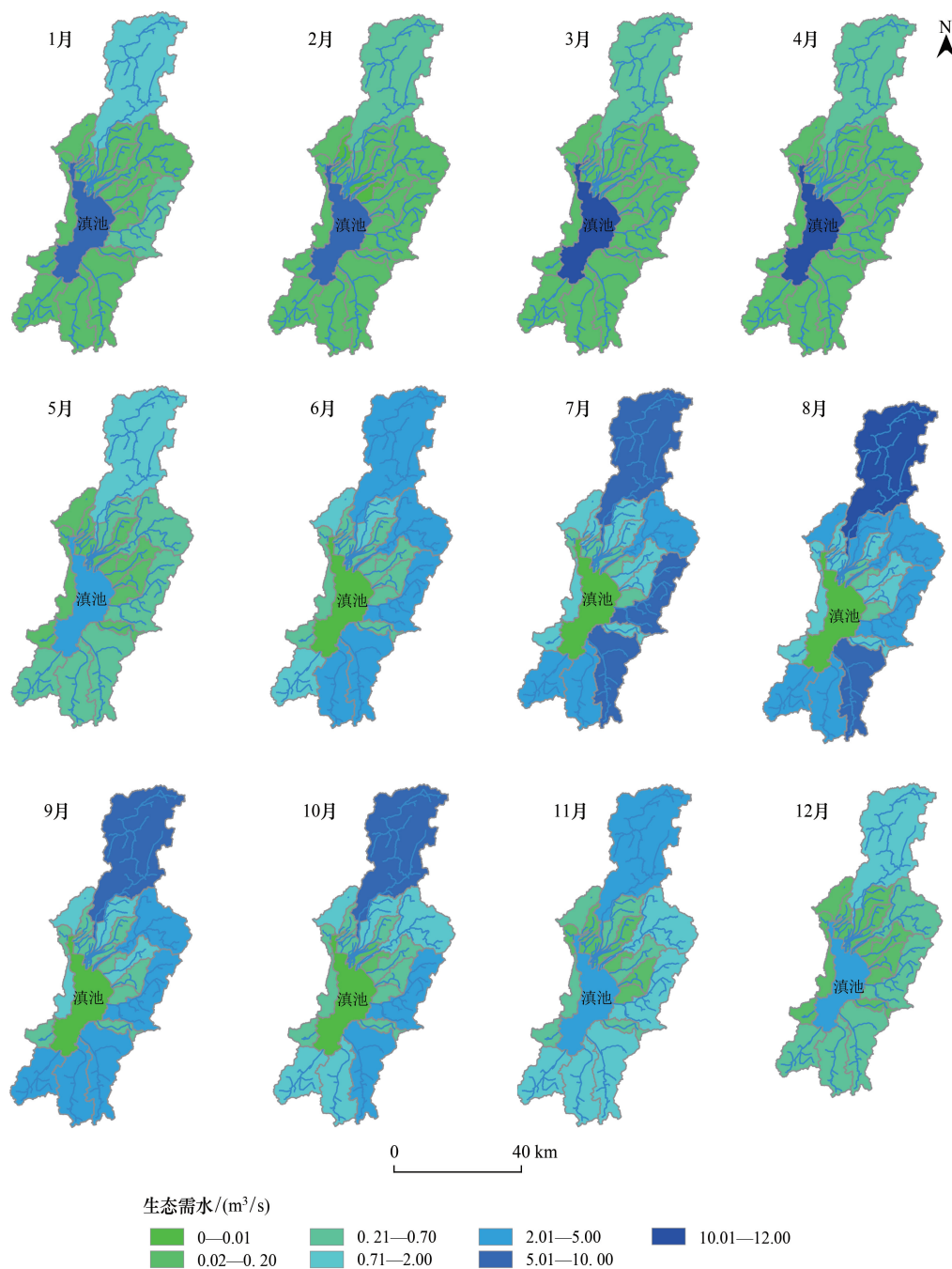


图3 滇池及各子流域在90%保证率下生态需水量

Fig. 3 The environmental flow requirement of Lake Dianchi and each sub-catchment under 90% assurance rate

法满足湖泊的水量平衡要求,此时流域内的生态需水主要考虑满足湖泊的生态需水要求。河湖生态系统的生态用水量远大于河流和湖泊最小生态需水量的简单加和。因此,仅计算河流或者湖泊的生态需水并不能反映流域内的实际生态需水要求,且要考虑到年内变化。

2.3 污染控制与生态用水权衡关系

河湖生态用水的计算结果表明,将水质纳入考虑后,河湖生态用水量远大于河流与湖泊生态需水的简单算术加和。滇池流域旱雨季分明,污染物入湖贡献也呈现秋冬季高于春夏季的分佈特征^[36-37],与滇池流域河湖生态系统生态用水年内分佈(图4)基本一致,说明水质对生态用水具有较大影响。

随着污染物削减比例增加,滇池流域河湖生态系统生态用水量和调水量呈指数降低;河流生态用水量呈线性降低(图5)。说明水体污染对滇池流域河湖生态系统生态用水具有较大的影响,入湖污染物浓度越高,生态用水量也会随之增大,由此将会激化水环境保护与经济社会发展之间的矛盾,严重制约经济社会的可持续发展^[38];削减入河和入湖污染物能够加速滇池水环境恢复^[23],减轻滇池流域的水资源压力。

由于滇池流域水环境污染严重,2003 年昆明市提出向滇池补水的问题,2007 年最终确定了牛栏江—滇池补水方案。许多学者就牛栏江调水对滇池水质的影响问题也做了许多预测研究。马巍等学者的研究^[39]表明滇池每年引水 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$,能显著改善滇池水质。蒲承松等学者的研究^[40]则表明到 2020 年,要使得外海水水质

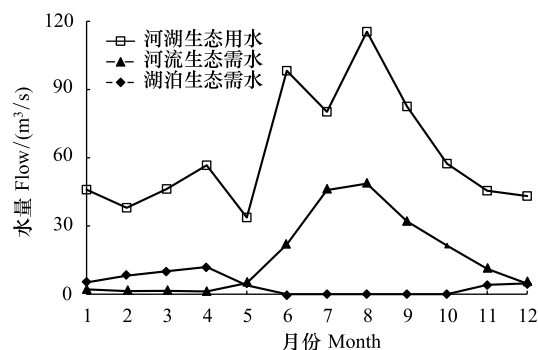


图4 滇池流域河、湖生态需水及河湖生态系统生态用水

Fig. 4 The environmental flow of rivers and the lake and the eco-environmental water demand of coupled ecosystem in Lake Dianchi Basin

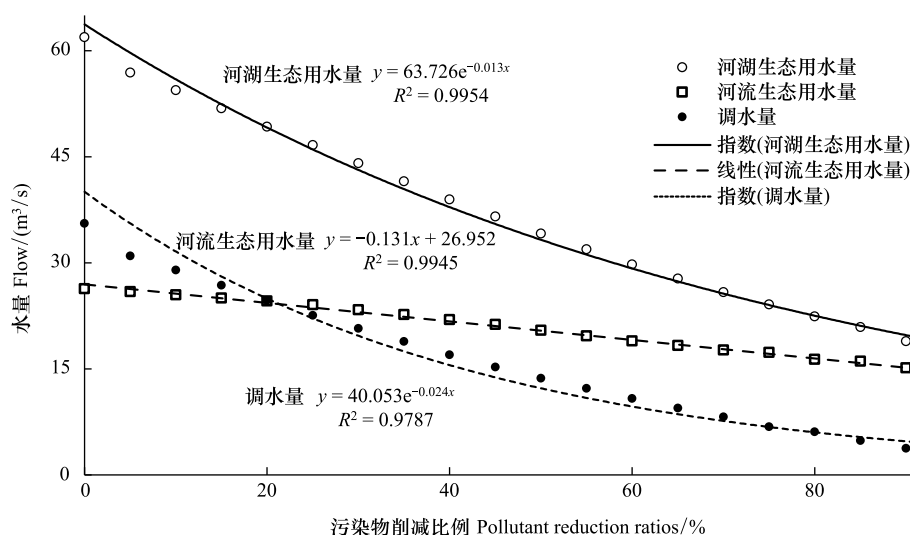


图5 不同污染物削减比例下调水量与生态用水变化

Fig. 5 Changes in annual water transfer volume and eco-environmental water demand under different pollutant reduction ratios

满足Ⅳ类水的要求,每年需调水 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。经过多方论证,牛栏江—滇池引水工程自 2013 年建成投入使用以来,实际每年平均引水量为 $5.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。然而图5表明,在当前水质状况下,现行调水量并不能满足河湖生态用水量,每年需调水 $11.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 才能满足河湖水质要求,远超过之前的预测调水量。

3 结论

基于优化模型对滇池流域河流和湖泊生态系统生态用水的优化分析,得到以下结论:

(1) 河湖复合生态系统的生态用水,并非河流和湖泊生态需水的简单相加,需要综合考虑河流和湖泊之间的水量联系。本研究以滇池流域为例,基于河湖复合生态系统的水量联系构建了河湖复合生态系统生态用水优化模型,得到滇池流域年生态用水量约为 $19.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(2) 在当前水质状况下,要使得流域内河流和湖泊都达到水质目标,每年需要引水约 $11.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,目前牛栏江年引水量 $5.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 不能满足流域内河湖生态系统的生态用水要求。

(3) 滇池流域水体污染对其生态用水影响较大,随着污染程度下降,滇池流域河湖复合生态系统生态用

水量和调水量呈指数下降,河流生态用水量呈现线性下降。削减入河和入湖污染物能够加速滇池水环境恢复,减轻滇池流域的水资源压力。

河湖生态系统与人类社会活动联系紧密,为了流域内生态系统健康和稳定,有必要对河湖生态系统生态用水进行评估,以便流域内有限水资源的合理配置。河湖复合生态系统水文情势较单一生态系统复杂,其生态用水的影响因素也较多,生态用水机理和规律尚不十分清晰。

参考文献 (References):

- [1] 樊灏, 黄艺, 曹晓峰, 高喆, 蒋大林. 基于水生态系统结构特征的滇池流域水生态功能三级分区. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1447-1456.
- [2] 唐克旺, 王浩, 刘畅. 陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究. 自然资源学报, 2003, 18(3): 304-309.
- [3] 曹宸, 李叙勇. 区县尺度下的河流生态系统健康评价——以北京房山区为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4296-4306.
- [4] 雷冠军, 殷峻暹, 王文川, 张丽丽. 基于 RVA 法和生态功能的河流生态需水量估计. 水电能源科学, 2018, 36(2): 47-50.
- [5] 姜亮亮, 焦键, 程艳, 王晓愚, 刘江, 李燕. 艾里克湖流域湖泊及植被生态需水研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 108-114.
- [6] 牛夏, 王启优. 疏勒河流域生态需水量研究. 人民长江, 2016, 47(22): 21-25.
- [7] 刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604-609.
- [8] 王西琴, 张远, 刘昌明. 基于二元水循环的河流生态需水水量与水质综合评价方法——以辽河流域为例. 地理学报, 2006, 61(11): 1132-1140.
- [9] Petts G E. Water allocation to protect river ecosystems. Regulated Rivers: Research & Management, 1996, 12(4/5): 353-365.
- [10] Raskin P D, Hansen E, Margolis R M. Water and sustainability: global patterns and long-range problems. Natural Resources Forum, 1996, 20(1): 1-15.
- [11] Resh V H. Periodical citations in aquatic entomology and freshwater benthic biology. Freshwater Biology, 1985, 15(6): 757-766.
- [12] 栗晓燕, 于鲁冀, 吕晓燕, 徐艳红, 郝子垚. 基于 B-IBI 评价淮河流域(河南段)河流生态健康. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2213-2220.
- [13] 徐志侠, 王浩, 唐克旺, 王研. 吞吐型湖泊最小生态需水研究. 资源科学, 2005, 27(3): 140-144.
- [14] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 吕兴菊, 薛力强, 储昭升. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响. 生态学报, 2018, 38(3): 876-885.
- [15] 万东辉, 夏军, 宋献方, 刘苏峡等. 基于水文循环分析的雅砻江流域生态需水量计算. 水利学报, 2008, 39(8): 994-1000.
- [16] 刘静玲, 杨志峰, 肖芳, 孙涛. 河流生态基流量整合计算模型. 环境科学学报, 2005, 25(4): 436-441.
- [17] 杨霄, 陈刚, 桑学峰, 顾世祥, 周祖昊. 基于河湖水系连通的高原湖泊水资源优化模拟. 中国农村水利水电, 2016, (9): 205-211.
- [18] 褚俊英, 严登华, 周祖昊, 吴迪, 刘琳. 基于综合功能辨识的城市河湖生态流量计算模型及应用. 水利学报, 2018, 49(11): 1357-1368.
- [19] 王西琴, 张远, 刘昌明. 辽河流域生态需水估算. 地理研究, 2007, 26(1): 22-28.
- [20] 李晨, 崔远来, 顾世祥, 邓雯, 韩焕豪. 滇池流域典型湿地植物需水规律试验研究. 中国农村水利水电, 2019, (3): 100-105.
- [21] 罗佳翠, 马巍, 禹雪中, 廖文根. 滇池环境需水量及牛栏江引水效果预测. 中国农村水利水电, 2010, (7): 25-28.
- [22] 邓雯, 陈刚, 王肖鹏, 顾世祥. 滇池外海环湖湿地生态需水研究. 灌溉排水学报, 2016, 35(1): 99-104.
- [23] 陈刚, 杨霄, 顾世祥, 邓雯, 周密. 基于河湖生态健康的滇池流域水资源总体配置. 水利水电技术, 2016, 47(2): 1-8.
- [24] 陈刚, 桑学峰, 顾世祥, 杨霄, 周祖昊, 李游洋. 多源水联合调度重构滇池流域健康水循环模式. 湖泊科学, 2018, 30(1): 57-69.
- [25] 邓伟明, 雷坤, 苏会东, 乔飞, 李福建. 2008 年滇池流域水环境承载力评估. 环境科学研究, 2012, 25(4): 372-376.
- [26] 胡春明, 娜仁格日乐, 尤立. 基于水质管理目标的博斯腾湖生态水位研究. 生态学报, 2019, 39(2): 748-755.
- [27] 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 徐春晓. 河道内生态需水估算方法及其评述. 水科学进展, 2006, 17(3): 430-434.
- [28] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 河流生态需水计算方法评述. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 5-9.
- [29] Bergström S. The HBV model: its structure and applications. Sweden: Swedish Meteorological and Hydrological Institute Report 4, 1992.
- [30] 李霖. HBV 水文预报模型及与之集成的水文模型系统介绍. 水利水文自动化, 2004, (2): 39-42.
- [31] 靳晓莉, 张奇, 许崇育. 一个概念性水文模型的参数区域化研究——以东江流域为例. 湖泊科学, 2008, 20(6): 723-732.
- [32] 赵海燕, 张亚琳, 王志伟, 茅彧, 安炜. 基于 HBV 模型确定沁河流域洪涝致灾临界雨量. 水土保持研究, 2015, 22(5): 74-78.
- [33] 金浩宇, 鞠琴, 谢季遥. HBV 模型在尼洋河流域的应用研究. 中国农村水利水电, 2019, (6): 23-28, 34-34.
- [34] 曹一梅. 滇池流域水资源开发潜力及承载力评价. 水电能源科学, 2013, 31(11): 32-34.
- [35] 刘佳旭, 李丽娟, 李九一, 王志勇. 滇池流域降水时空变异特征分析. 地球信息科学学报, 2015, 17(4): 451-461.
- [36] 李乐, 王海芳, 王圣瑞, 张蕊, 焦立新, 丁帅, 余佑金. 滇池河流氮入湖负荷时空变化及形态组成贡献. 环境科学研究, 2016, 29(6): 829-836.
- [37] 余佑金, 方向京, 王圣瑞, 张蕊, 焦立新, 李乐, 汪学华. 滇池水体不同形态磷负荷时空分布特征. 湖泊科学, 2017, 29(1): 59-68.
- [38] 崔丹, 李瑞, 陈岩, 马冰然, 贾紫牧, 曾维华. 基于结构方程的流域水环境承载力评价——以湟水流域小峡桥断面上游为例. 环境科学学报, 2019, 39(2): 624-632.
- [39] 马巍, 李锦秀, 田向荣, 廖文根. 滇池水污染治理及防治对策研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(1): 8-14.
- [40] 浦承松, 梅伟, 谢波, 罗佳翠, 苏建广. 牛栏江-滇池补水工程调水量分析. 中国农村水利水电, 2011, (7): 63-65, 68-68.