

基于水供给服务流的滇池流域生态补偿区域划分与标准测算研究

刘璇

云南财经大学财政与公共管理学院, 云南 昆明

收稿日期: 2023年9月19日; 录用日期: 2023年11月20日; 发布日期: 2023年11月27日

摘要

水供给服务流对流域的水循环和水量平衡, 以及人类的生存和发展起到至关重要的作用。由于生态系统服务具有流动性和空间异质性, 水供给服务的供给和需求往往存在不匹配的问题, 而生态补偿是协调相关利益主体、实现流域内经济-社会-生态协调可持续发展的有效手段。本文以滇池流域为例, 基于流域2020年土地覆被、气象观测和统计年鉴等数据, 采用供需平衡模型计算滇池流域产水量和需水量, 利用水供给服务价值量模型计算滇池流域生态补偿额度, 采用生态补偿优先级法确定优先受偿区域。结果表明: ① 滇池流域生态补偿的支付区, 为五华区、盘龙区、呈贡区和官渡区; 生态补偿的受偿区, 为西山区、晋宁县和嵩明县。② 根据生态补偿优先级的排序, 五华区应当率先支付, 其次为官渡区、呈贡区和盘龙区; 嵩明县应当最先受到补偿, 其次为晋宁县、西山区。③ 滇池流域生态补偿总额度为2.47亿元, 其中水供给服务每公顷应受偿/支付4535元。

关键词

水供给服务, 生态补偿, 优先级, 滇池流域

Study on Regional Division and Standard Calculation of Ecological Compensation Based on Water Supply and Service Flow in Dian Lake River Basin

Xuan Liu

School of Finance and Public Administration, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming Yunnan

Received: Sep. 19th, 2023; accepted: Nov. 20th, 2023; published: Nov. 27th, 2023

Abstract

Water supply service flow plays a vital role in the water cycle and water balance, as well as the survival and development of human beings. Due to the mobility and spatial heterogeneity of ecosystem services, the supply and demand of water supply services often do not match, ecological compensation is an effective means to coordinate the relevant stakeholders and realize the sustainable development of economy, society and ecology in the basin. Taking the Dian Lake River basin as an example, this paper adopted the supply-demand balance model to calculate the water production and water demand of the Dian Lake River basin based on the data of land cover, meteorological observations and statistical yearbook in 2020, the water supply service value model was used to calculate the ecological compensation amount in the Dian Lake River basin, and the priority area was determined by the ecological compensation priority method. The results showed that 1) the payment areas of ecological compensation in the Dian Lake basin were Wuhua District, Panlong District, Chenggong and Guandu District, and the payment areas of ecological compensation were Xishan District, Jinning County and Songming County. 2) According to the priority of ecological compensation, Wuhua District should be the first to pay, followed by Guandu District, Chenggong and Panlong District, and Songming County should be the first to receive compensation, followed by Jinning County and Xishan District. 3) The total amount of ecological compensation in the Dian Lake River basin is 247 million yuan, of which 4,535 yuan per hectare is compensation payment for water supply services.

Keywords

Water Supply Services, Ecological Compensation, Priority, Dian Lake Basin

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

淡水资源是人类生存不可或缺的基础性资源，同时也是所有生态系统服务中价值最高的[1]。随着人口增长和社会经济的发展，水资源过度开发与利用使得区域水资源难以满足当地社会经济和生态环境协调发展的需要，因水资源不足而导致区域之间水供给服务供需空间上不匹配的问题已成为全球关注的焦点之一[2] [3]。

水供给服务流能够明确水资源供需情况并进行量化评估，判断供需空间是否匹配，因此，对水供给服务的供需平衡进行量化研究，明确水供给服务所产生的效益和各个市(县区)对水资源的消耗情况，能够科学界定水供给支付区和受偿区和合理的生态补偿标准[4] [5] [6]。

滇池流域因为其较好的地理、气候、物质资源等自然条件而适宜人类生存和社会发展[7]。随着全球气候变暖和云南省城市化的快速推进，滇池及其流域的资源尤其是水资源被过度消耗，引发生态环境状况急剧下降和水资源危机[8]，近年来针对滇池及其流域的治理取得了显著成效，自2008年滇池实质性治理让滇池流域境况日益好转，但是截至2022年，应当看到水资源严重缺乏是客观持续存在的。滇池流域上下游虽是利益共同体，但彼此之间水资源供给需求和经济发展不平衡问题日益突出，水环境纠纷不断出现，因此如何有效保护和合理开发流域水资源，提高有效资金使用效率，引导社会力量参与，并保证流域水资源和经济、社会能够协调健康发展，仍然是一项长期挑战。

故本文以滇池流域作为研究区，基于2020年土地利用数据、气象数据、土壤数据等使用供需比探究

流域内水资源供给能力与水资源需求之间的供需状况，利用 InVEST 模型、水资源安全指数等识别和量化生态补偿主客体之间的补偿关系与补偿价值，并引用了生态补偿优先级(ECPS)量化生态补偿顺序，以期为流域内生态补偿机制的建立提供科学的依据[9][10]。

2. 研究区概况

滇池流域(24°28'N~25°28'N, 102°30'~103°00')，地理位置图详见图 1，流域面积为 2920 平方公里，流域南北长 114 km，东西平均宽 25.6 km。2020 年，滇池流域径流量达到 $1.798 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据滇池流域的水环境保护治理规划，滇池流域多年平均可供水量仅 $5.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，整个流域水资源总量为 5.55 亿立方米，人均水资源量仅为 155 立方米，属水资源严重缺乏地区[11][12]。

滇池流域是昆明市社会经济和城市发展最为集中和最有活力的地区。包含了昆明市辖区范围，内有五华区、官渡区、盘龙区、西山区、呈贡区、晋宁县和嵩明县，在快速城镇化和经济发展的过程中，各种生态环境问题凸显，其中，流域水资源被过度使用，水资源供需矛盾越来越突出[13]。本文的研究框架图如图 2 所示。

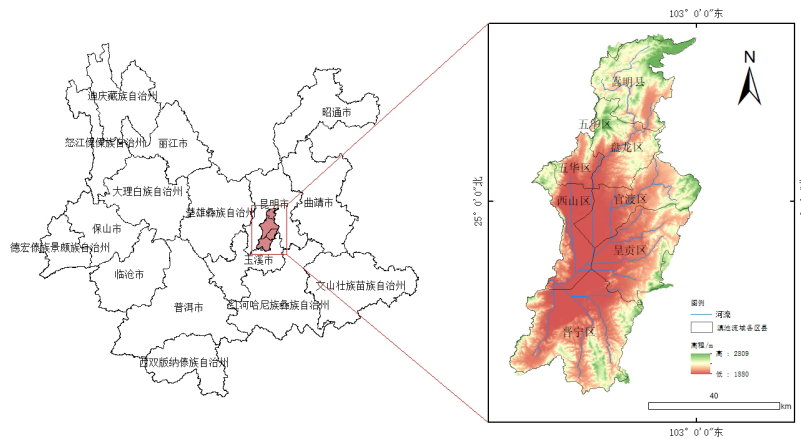


Figure 1. Map of the Dian Lake River basin
图 1. 滇池流域地理位置图

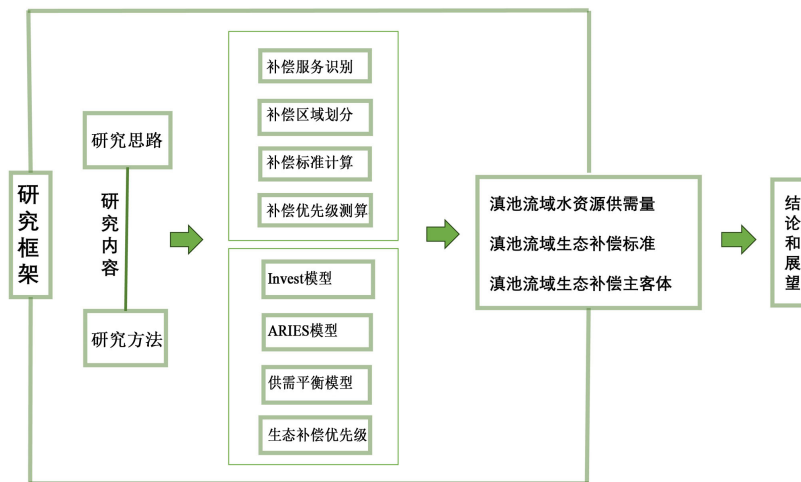


Figure 2. A framework map
图 2. 研究框架图

3. 研究方法

3.1. 数据来源及预处理

统计数据包括 2021 年云南省统计年鉴和昆明市统计年鉴。其他数据包括云南省行政区划图, 以及研究区域其他自然、经济和社会等相关资料和文献。

研究单元为滇池流域内的各区县, 研究区数据主要包括土地利用变化数据、高程、坡度、降水量、气温、土壤、潜在蒸散发和模型的物理参数, 土地利用变化监测数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。降水量、气温数据来源研究区及其周边的气象站点数据。数据来自国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/>)。土壤数据来自联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界土壤数据库(HWSD)。产水服务价格来自中国水网(<https://www.h2o-china.com/price/>) [14]。

3.2. 生态补偿区域划分

本文采用供需平衡模型, 运用 InVEST 模型中的产水量模块, 即主要依据水量平衡原理, 由各单元的降水量减去实际蒸散发量即得到该单元产水量, 得出滇池流域总的水供给量, 水需求服务模型主要依据滇池是昆明市工农业生产与生活用水的主要水源地, 于是水需求量包括 4 大类: 农业用水、工业用水、居民生活用水(包括农村居民与城镇居民)、畜牧用水。根据滇池流域水资源安全指数取值范围、用水安全指数和水供给服务供需平衡特征, 将自身产水能力不能满足其用水需求, 需要从水供给服务流中获益的区域作为生态补偿的支付区, 将自身产水能力能够满足其用水需求, 并能够为支付区提供水供给服务的区域作为生态补偿的受偿区。生态补偿区域框架图如图 3 所示。

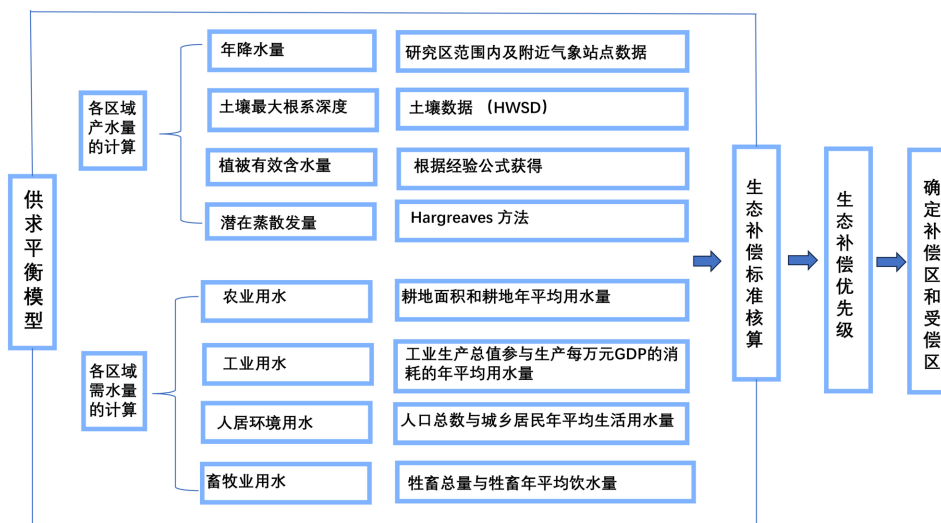


Figure 3. A framework map of ecological compensation area
图 3. 生态补偿区域框架图

3.2.1. 水供给服务供给模型

本文采用 InVEST 模型中的产水模块计算滇池流域的产水量, 其基本原理是根据地形、土地利用、气候和土壤等数据, 基于水量平衡计算产水量。

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

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + W_x \times R_{xj}}{1 + W_x \times R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

$$W_x = Z \times \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R = \frac{K_{xj} \times ET_x}{P_x} \quad (4)$$

Y_{xj} 表示某种土地利用类型在栅格 x 上的年降水量(mm/a), AET_{xj} 表示某种土地利用类型在栅格 x 上的实际蒸散发量(mm/a), P_x 表示栅格 x 上的年降水量(mm/a)。对于不同土地利用类型, 矢量平衡的蒸散发比值由 Zhang 等提出的 Budyko 曲线算法估算得出。根据模型原理所需数据包括年均降水量、年均潜在蒸发量、土壤深度、土壤有效含水量、土地利用类型、流域矢量数据和 Z 常数。 ET_x 潜在蒸发量采用 Hargreaves 方法计算, 土壤深度数据通过世界土壤数据库利用空间掩膜提取; 植被根系深度和植被蒸散系数通过查阅模型说明获得; 植被有效可利用水 AWC_x 由经验公式 Gupta 等计算。 Z 为 Zhang 系数(季节因子, 与降雨季节分布有关的位于 1~30 之间的浮点型数据), 经计算 Z 常数取值为 21.4 [15] [16] [17]。

3.2.2. 水需求服务模型

根据 ARIES 模型对水资源消耗的定义, 结合滇池流域的用水特点及数据获取情况, 本文将水资源需求最终确定为农业用水、工业用水、人口生活用水、牲畜用水。

本研究中水资源需求量计算公式如下:

$$W = W_{agr} + W_{ind} + W_{dom} + W_{lic} \quad (5)$$

W 表示 x 区县的需水总量, W_{agr} 表示农业灌溉用水, W_{ind} 表示工业用水, W_{dom} 表示城乡居民生活用水, W_{lic} 表示牲畜用水。

W_{agr} 由耕地面积和每公顷耕地的年平均灌溉用水量相乘得到; W_{ind} 由工业生产总产值与生产每万元 GDP 所消耗的年平均用水量相乘得到; W_{dom} 是人口总数与城乡居民的年平均生活用水量相乘得到; W_{lic} 由牲畜总数与牲畜年平均饮水量相乘得到。

3.3. 供需平衡模型

对生态系统服务的供需平衡格局进行分析时, 一个地区的水资源供给量与需求量的比值(即供需比 S:D)是用来评估区域用水供需平衡状况的重要指标。在本研究中, 对流域水供给服务的供需平衡进行评估, 当指数大于零, 表示服务盈余, 为流域的受偿区; 当指数小于零, 表示服务有限, 需从服务流中获益, 为流域的支付区。

$$FSI = \lg\left(\frac{Y_{xj}}{W}\right) \quad (6)$$

式中: Y_{xj} 为年降水量, W 表示水资源需求量[18]。

3.4. 生态补偿优先级

综合考虑滇池流域的不同区域的经济水平, 引入生态补偿优先级指数(ECPS)来表示不同区域获得生态补偿的优先级。生态补偿优先级反映的是区域生态补偿的迫切程度和对经济发展的影响效果, 生态补偿优先级值越小, 说明该区域支付生态补偿后对其经济状况影响越小, 越应当率先支付生态补偿资金。

$$E_i = \frac{V_i}{q_i} \quad (7)$$

E_i 为某地区水供给生态补偿优先级指数； V_i 为某地区单位面积水供给服务价值， q_i 为某地区单位面积生产总值。

4. 结果与分析

4.1. 供需水量

2020 年滇池流域水供给服务总产水量为 $0.94 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，分县区人均产水量为 154.26 m^3 ，产水量的排序为嵩明县 > 晋宁区 > 西山区 > 官渡区 > 盘龙区 > 呈贡区 > 五华区，嵩明县的产水量远远大于其他县区。各县区详细数据如表 1 所示。

滇池流域总水需求量为 $0.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，分县区人均需水量为 113.04 m^3 ，需水量排序为嵩明县 > 官渡区 > 五华区 > 西山区 > 盘龙区 > 晋宁区 > 呈贡区，呈现北高南低的空间格局。需水量大的地区为嵩明县、官渡区、五华区，主要是工业用水和人口用水多。

Table 1. Water production and demand of Dian Lake River basin in 2020

表 1. 2020 年滇池流域各县区产水量与需水量

| | 产水量(万 m^3) | 需水量(万 m^3) |
|-----|----------------------|----------------------|
| 五华区 | 2279 | 12297.03126 |
| 官渡区 | 10446.44752 | 11646.06372 |
| 盘龙区 | 7455.003642 | 4719.051607 |
| 西山区 | 10741.44853 | 3806.163894 |
| 呈贡区 | 2851.325799 | 5058.213095 |
| 晋宁县 | 21057.5453 | 997.1799016 |
| 嵩明县 | 39317.3773 | 1086.687549 |

4.2. 水资源安全指数

2020 年滇池流域水资源安全指数取值范围在 -1 和 2 之间，水资源安全指数约为 0.14，可以看出总体上滇池流域的产水能力能够满足人们生产生活的用水需求，将水资源安全指数进行等级划分，即 $FSI < -1$ 、 $-1 \leq FSI \leq 0$ 、 $0 < FSI \leq 1$ 、 $FSI > 1$ ，需要从水供给服务流中获益的区域作为生态补偿的支付区，为五华区、呈贡区、盘龙区和官渡区；将自身产水能力能够满足其用水需求，并能够为支付区提供水供给服务的区域作为生态补偿的受偿区，为西山区、晋宁县和嵩明县。

4.3. 生态补偿额度测算结果

通过水供给服务的供需平衡状况分析，滇池流域的产水主要集中在流域北部和流域南部，用水量主要集中在流域北部地区以及中部地区，供需空间不匹配。根据生态补偿原则，通过水供给服务功能价值量计算，滇池流域水供给服务的总价值量约 4.6 亿元，生态补偿受偿区西山区应得到补偿资金约 0.11 亿元，晋宁县应得到补偿资金约 0.15 亿元，嵩明县应得到补偿资金约 1.78 亿元；生态补偿支付区五华区应支付约 0.76 亿元，呈贡区应支付约 0.26 亿元，官渡区应支付约 0.44 亿元，盘龙区应支付 0.1 亿元。滇池流域生态补偿总额为 2.47 亿元，其中水供给服务每公顷应受偿/支付 4535 元。

水资源安全指数划分 $FSI < -1$ 自身的产水能力无法满足其用水需求，需要从水供给服务流获益； $-1 \leq FSI \leq 0$ 自身的产水能力无法满足其用水需求，需要从水供给服务流的部分获益； $0 < FSI \leq 1$ 自身产水能力能够满足其用水需求，有盈余；五华区应当率先支付，其次为官渡区、呈贡区和盘龙区；嵩明县应当

最先受到补偿，其次为晋宁县、西山区。

5. 结论与讨论

5.1. 结论

以滇池流域为例，文章首先识别了流域水资源短缺这一现状，基于供需平衡模型，确定了流域生态补偿的受偿区与支付区及生态补偿优先级，并利用 InVEST 模型评估了水供给服务流流量，确定了生态补偿的标准，主要结论如下：

(1) 滇池流域 2020 年水供给服务总产水量为 $0.94 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，集中分布在嵩明县、晋宁区；嵩明县的产水量远远高于其他县区，西山区、官渡区和盘龙区产水量相差不大，五华区产水量最小。

(2) 滇池流域生态补偿的支付区，为五华区、盘龙区、呈贡区和官渡区；生态补偿的受偿区，为西山区、晋宁县和嵩明县。根据生态补偿优先级的排序，五华区应当率先支付，其次为官渡区、呈贡区和盘龙区；嵩明县应当最先受到补偿，其次为晋宁县、西山区。

(3) 根据水供给服务的生态系统服务功能价值量计算，滇池流域生态补偿总额度为 4.94 亿元，其中水供给服务每公顷应受偿/支付 4535 元。

5.2. 讨论

与其他流域相比，滇池流域生态补偿表现出明显的区域特色，主要有以下明显特征：① 滇池流域在行政区属于昆明市，是昆明城市发展的空间载体，在云南省快速城市化工业化的推进中，一味追求经济发展而导致生态环境的破坏，尤其是水资源短缺、污染的问题仍未彻底解决，为恢复生态，部分县区采取严格的环境保护措施，也因此面临可能丧失发展机会的问题。因此，针对滇池流域的生态补偿不仅侧重于解决供需之间的矛盾，还应将资金应用于受偿区以弥补其经济发展，实现流域内各县区的经济 - 社会 - 生态协调可持续发展。② 区别于大部分流域一般上游为生态功能区，下游为生态受益区特征，滇池流域的中部地区由于人口密集和城市化的发展，其经济功能更为显著，用水量巨大，也因此区别于大部分流域下游向上游支付的单向生态补偿特征，滇池流域水供给服务生态补偿为流域中部向流域上游和流域下游进行补偿[19] [20] [21] [22]。

水供给服务需求是指人类从事生活、生产活动而消耗的各类水资源，强调的是发生在特定土地利用空间上的用水量。因此，本文通过将用水统计数据与土地利用类型之间建立对应关系，实现了流域用水量的空间化表达。但由于可以获取的数据有限，本文中只考虑了农田灌溉的用水量、工业生产用水量、居民生活用水量(分城乡)、部分牲畜的饲养用水，并没有涵盖流域内所有的社会生产、生活用水和维持自然生态过程需要的水资源使用量，可能会造成部分区域的用水量被低估的情况。在研究过程中，文章也存在一定局限性。如论文仅注重流域水供需情况的生态补偿，流域其他重要的服务并未考虑在内，导致生态补偿标准低于生态系统服务的实际价值。

基金项目

2022 年云南省教育厅科学研究基金项目“滇池流域基于水供给服务流的生态补偿额度测算研究——以滇池流域为例”。

参考文献

- [1] 耿翔燕, 李文轩. 中国流域生态补偿研究热点及趋势展望[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2153-2163.
- [2] Boithias, L., Acuña, V., Vergoñós, L., Ziv, G., Marcé, R. and Sabater, S. (2014) Assessment of the Water Supply: De-

- mand Ratios in a Mediterranean Basin under Different Global Change Scenarios and Mitigation Alternatives. *Science of the Total Environment*, **470**, 567-577. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.003>
- [3] Khan, I. and Zhao, M.J. (2019) Water Resource Management and Public Preferences for Water Ecosystem Services: A Choice Experiment Approach for Inland River Basin Management. *Science of the Total Environment*, **646**, 821-831. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.339>
- [4] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [5] 王丹妮, 郭青云, 王志浩, 林慧龙. 生态系统水供给服务空间流动研究进展[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 1-8. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.001>
- [6] Trisurat, Y., Eawpanich, P. and Kalliola, R. (2016) Integrating Land Use and Climate Change Scenarios and Models into Assessment of Forested Watershed Services in Southern Thailand. *Environmental Research*, **147**, 611-620. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.019>
- [7] 杨枫, 许秋瑾, 宋永会, 等. 滇池流域水生态环境演变趋势、治理历程及成效[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 633-643.
- [8] 付磊, 李增华. 近 20 年滇池流域土地利用/覆被变化过程、特征及其生态价值变化研究[J]. 生态经济, 2022, 38(6): 183-191.
- [9] 曾广权, 洪尚群, 张星梓, 等. 建立云南省生态补偿机制的研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2006.
- [10] 范弢. 滇池流域水生态补偿机制及政策建议研究[J]. 生态经济, 2010(1): 154-158.
- [11] 李森, 何佳, 徐晓梅, 周鸿斌, 王丽. 滇池流域河道整治的发展与展望[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S1): 131-136.
- [12] 刘林, 雷冬梅, 冉玉菊, 等. 基于生态系统服务功能的滇池流域关键性生态用地识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 277-284.
- [13] 王启名, 杨昆, 李立晓, 朱彦辉, 樊贤. 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析[J/OL]. 生态学报, 2023(12): 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20221008.1308.008.html>
- [14] 刘春芳, 王佳雪, 许晓雨. 基于生态系统服务流视角的生态补偿区域划分与标准核算——以石羊河流域为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(8): 157-165.
- [15] 郭丽洁, 尹小君, 苟贞珍, 等. 基于 InVEST 模型的阿克苏河流域产水量评估及环境因素影响研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(2): 216-224.
- [16] 温庆, 张刘东, 代启亮. 滇池流域多年 ET₀ 及其影响因素变化趋势分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 27-35. <https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2018.12.004>
- [17] 温庆, 张刘东, 代启亮. 滇池流域近 30 年参考蒸腾蒸发量计算方法探讨[J]. 人民珠江, 2018, 39(12): 36-43.
- [18] 陈登帅, 李晶, 张渝萌, 张城, 周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 112-122.
- [19] 邓明翔. 滇池流域生态补偿机制研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南财经大学, 2012.
- [20] 熊伟, 杜雪芳, 左芸, 等. 石羊河流域生态补偿机制与优化策略研究[J]. 人民长江, 2023, 54(6): 54-59. <https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.06.008>
- [21] 张倩. 黄河流域横向生态补偿的协同治理困境与实践路径[J]. 人民黄河, 2023, 45(8): 54-58+67.
- [22] 尹正杰, 庄超, 陈进. 长江干流跨省横向生态补偿机制框架探讨[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(7): 16-21.