



不确定性条件下斯里兰卡马哈韦利河流域农业水权交易研究

刘美^{1,2}, 尤立^{2,✉}, 胡春明², 郝文龙^{1,✉}

1. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国科学院生态环境研究中心工业废水无害化与资源化国家工程研究中心, 北京 100085

摘 要 在水资源利用过程中, 水权交易可促使用水效率较低的主体将水权转让给用水边际效益较高的主体, 实现区域整体效益最大化。作为“一带一路”倡议的重要节点国家, 选取斯里兰卡的马哈韦利河流域为研究区域, 基于区间两阶段随机双层不确定性规划方法构建农业水权交易模型, 处理社会经济数据的不确定性、地表水资源量的随机性以及系统的多目标性。研究表明: 初始水权总量受气候变化影响, 整体上呈现随降水增加而增加, 随温度升高而降低的规律。此外, 水权交易中, 水稻种植业为主要买家, 乳畜业为主要卖家。水权交易后, 持有水权量最大的行业和区域分别是水稻种植业和波隆纳鲁沃县, 其中初始水权分配对水权持有量影响较大。研究结果可提高变化气候下的马哈韦利河流域水资源管理科学性, 逐步构建水资源综合管理, 水权合理分配的新局面。

关键词 不确定性; 水权交易; 斯里兰卡; 马哈韦利流域; 水资源管理

如何帮助发展中国家在水资源领域开展全方位的能力建设, 解决经济社会发展过程中面临的水资源危机, 既是联合国 2030 年可持续发展目标的核心内容, 也是构建人类命运共同体的重要路径^[1]。斯里兰卡是我国“一带一路”重要节点国家, 位于古“丝绸之路”南线与“海上丝绸之路”的交汇处, 地理位置十分重要^[2-3]。受热带季风气候影响, 全国平均降水量较少且分布不均, 斯里兰卡西南部水资源相对集中, 但中部、北部和东部较为缺乏, 雨季暴雨频繁, 旱季水源紧缺^[4]。日益增加的气候变化压力以及人类的活动引起的水资源供求失衡, 加剧了区域内水资源短缺的现象^[5]。同时受本国经济制约, 斯里兰卡缺乏有效的管理机制, 水资源空间分布不平衡的问题日益突显^[6]。因此, 提出行之有效的水资源管理机制, 协助当地决策者构建完善的水资源管理体系十分重要。

水权交易及相关制度的建立是缓解水资源短缺状况, 实现资源环境和社会经济可持续发展的有效方式之一^[7-9]。谢文静等^[10]通过构建不确定性水权交易模型, 定量的分析了自然湿地参与交易机制对大沽河流域水资源系统的效应, 为自然湿地作为市场主体参与水权交易提供理论基础。ZAMAN 等^[11]研发了一种水权交易与水分分配的耦合模型, 用于澳大利亚维多利亚州北部的水权交易市场。裴源生等^[12]在分析黄河水量及用户需求的基础上, 运用层次分析和模糊决策理论相耦合的技术, 通过置换水量构建了水权分配指标体系。戎丽丽等^[13]探究了农用期权交易的触发条件及驱动因素, 实现了农用水权期权交易触发的良性循环。

水资源系统研究中存在多种复杂性, 包括水文参数、径流的随机性、社会经济发展因子的不确定性以及不同用户需水量、用水效益及供水成本的多目标性^[14-15]。传统的确定性配置模型多采用系统简化法处理这些不确定性问题, 结果偏理想化, 提供信息量较少且存在局限性, 不能准确地反映实际情况, 而不确定优化技术及模拟技术等往往能解决上述问题^[16-17]。李东林等^[18]提出了区间模糊可信度的双层规划 (IFCBP) 模型, 使用区间值和模糊集来处理不确定信息, 规划了中国南水北调中线工程河南段的水资源配置。赵雷等^[19]建立

收稿日期: 2024-03-08 录用日期: 2024-04-02

基金项目: 中国-斯里兰卡水技术研究与示范联合中心资助项目; 中国科学院中国-斯里兰卡联合科教中心资助项目

第一作者: 刘美 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源规划与管理, lm199877@163.com ✉通信作者: 尤立 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为水资源规划与管理, liyout@rcees.ac.cn; 郝文龙 (1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为区域水资源对气候变化的响应, hw15022202@163.com

了基于不确定性条件下的波罗湖湿地补水工程净碳汇优化模型,获得了净碳汇量最大目标下的波罗湖湿地生态补水优化方案。BEKRI 等^[20]结合多阶段随机规划,提出了模糊边界区间线性规划的方法,应用于希腊阿尔菲奥斯河流域。DAI 等^[21]将多阶段灌溉水量分配模型应用于漳卫南流域,用于解决多种作物的灌溉目标以及不同生长阶段的水资源分配方案。

目前已经开发的多种水权交易模型虽然可以用来支持水资源系统的管理,但是不确定性优化方法的提出还是能够极大地提高水权交易过程的准确性^[22]。现有的水权交易研究中,采用的方法主要是将不同用户之间的用水需求问题转换成约束非线性优化问题。这些确定性方法不能单独处理含有随机变量等要素,无法规避系统中不同用户之间的冲突,优化技术则是解决这些困难的有效方法^[23-24]。本研究以斯里兰卡的马哈韦利河流域为研究区域,作为斯里兰卡境内最大的流域,沿线大部分地区面临水资源短缺现象。因此,基于气候变化下地表水资源模拟预测,结合两阶段规划、区间规划和双层规划等不确定性优化方法,构建区间双层两阶段随机农业水权交易决策模型,提出了不同情景下多用户多地区的初始水权分配和二次水权交易方案,为马哈韦利河流域水资源合理配置提供决策依据,为解决“一带一路”沿线发展中国家的水资源问题提供经验。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

斯里兰卡中部地势高,四周地势较平坦,北部和西南的狭窄区域为低洼的平原,由于双峰降雨模式的影响,该国只有旱季和雨季之分,大约有三分之二的土地面积按气候划分干旱区^[25],因为该地区1年只有3个月大雨,其余九个月连续干旱,水资源明显存在着时空分布不均的现象。马哈韦利河是斯里兰卡国内的第一大长河,全长333 km^[26],迂回曲折,沿途有平原、山脉、峡谷、瀑布,流域面积可达10 448 km²,占该国陆地面积的15% (图1)。流域年径流量约为 $84 \times 10^8 \text{ m}^3$,常引水用于灌溉,流域下游有超1 400 km²的水稻种植区,耕地面积增加导致农业用水量剧增,过度开采和利用地表水和地下水,导致生态用水严重不足,农业灌溉浪费水资源现象极其严重^[27]。马哈韦利河流域横跨国内湿润区、过渡区、干旱区3个气候区,流域内不同的气候致使降雨和水资源量空间分布不均^[28],上游年总降水量达到6 000 mm,而下游的平均年降水量仅约为1 600~1 900 mm,流域下游地带属斯里兰卡岛的东北旱区,该区域聚集了大量依靠灌溉农田维持生计的农民,流域沿线平坦的天然地势决定了无法依托地形构建蓄水工程,又因当地经济状况的制约,大型的水利设施建设存在障碍。

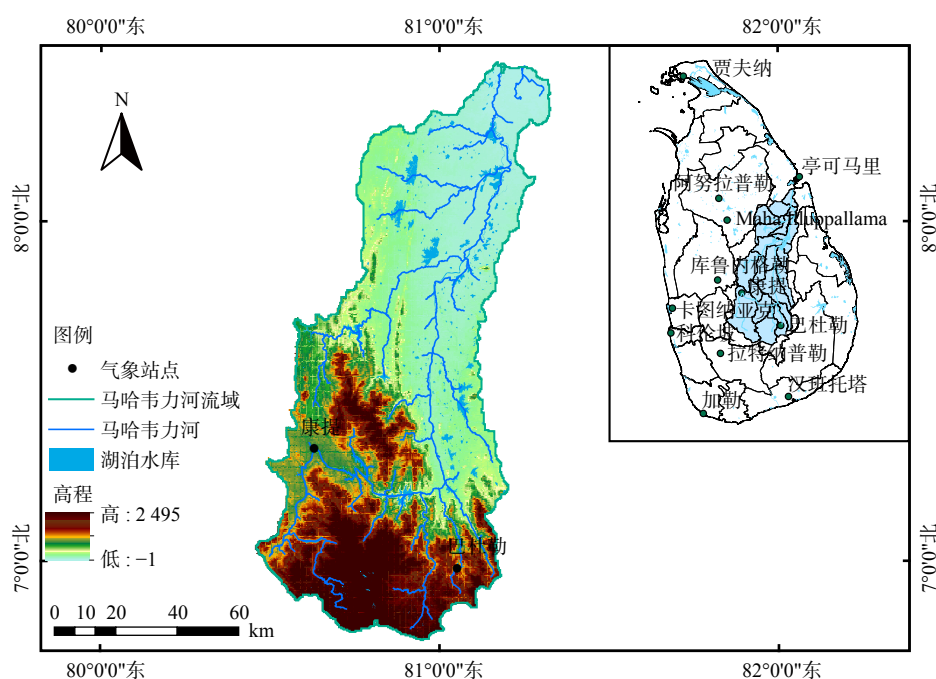


图1 马哈韦利河流域范围

Fig. 1 Range of the Mahaveli River basin

1.2 数据来源

本研究对马哈韦利河流域开展多气候变化情景下地表水资源模拟预测, 获得不同来水年来水量, 作为流域水权总量取值依据。在 DIVA-GIS 软件平台获取马哈韦利河流域空间数据库中的 DEM 数字高程数据, 水文和气象数据等, 主要用来进行流域径流模拟, 通过模拟径流与实测径流之间的数据拟合, 率定期和验证期纳什效率系数 (NSE) 分别为 0.817 和 0.940, 径流的精度模拟效果较好, 可用于估算不同气候变化情景状况下的地表水资源总量^[29]。决策模型考虑马哈韦利河流域水稻种植业、乳畜业、家禽养殖业以及淡水鱼养殖业等行业主要产品的生产规模, 产量以及经济效益, 历史经济数据 (2018—2022 年) 来自《Mahaweli Statistical Hand Book 2021》、《Annual Report 2018 Mahaweli Authority of Sri Lanka》、斯里兰卡统计局和相关研究论文, 基于历史数据, 借助线性预测和多年平均法得到规划期 (2024—2025 年) 数据。

1.3 研究方法

1.3.1 双层规划 (BP)

双层规划是一种嵌套优化, 涉及两个决策者, 即上层决策者和下层决策者。每一方都有自己独立的目标功能, 并影响另一方的反应。在双层规划中, 上层规划问题和下层规划问题分别通过各自目标函数和约束条件来求解优化。上层规划问题依赖于下层规划问题最优解, 下层规划问题最优解受上层规划问题影响^[30]。BP 模型的公式如式 (1)、(2) 所示。

$$\max_x F_U(X, Y) \quad (1)$$

$$s.t. G_1(X, Y) \leq 0 \quad (2)$$

其中:

$$Y \in \arg \max_Y f_L(X, Y) \quad (3)$$

$$s.t. g_1(X, Y) \leq 0 \quad (4)$$

式中: $X \in R^{n_1}$ 和 $Y \in R^{n_2}$ 分别是指示上层和下层选择的决策变量的向量。设 $F_U: R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R$ 和 $F_L: R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R$ 分别为上层和下层目标函数 $G_1: R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R$ 和 $g_1: R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R$ 是双层约束。双层多目标规划问题中, 对每一个固定容许的上层决策变量 x , 下层决策者将反馈其最优化目标函数和决策变量 y , 上层决策者再根据反馈情况综合考虑全局问题最优决策。

1.3.2 区间两阶段随机规划 (ITSP)

区间线性规划方法是针对现实生活中可能出现变化波动的参数采用上下界区间来表示其可能的最大最小值, 计算结果同样以区间值的形式输出, 进而提高模型的准确性、可靠性。两阶段随机规划方法是在随机事件发生后, 通过引入追索行为, 针对违约事件产生之前决策的行为活动, 进而对决策开展补偿修正, 减少降低不确定信息导致决策失误带来的经济损失^[31]。区间两阶段随机规划的模型 (ITSP) 表达式如式 (5) 所示。

$$\text{Max} f^\pm = \sum_{j=1}^{n_1} c_j^\pm x_j^\pm - \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{h=1}^s p_h e_j^\pm y_{jh}^\pm \quad (5)$$

约束条件见式 (6)~(9)。

$$\sum_{j=1}^{n_1} a_{rj}^\pm x_j^\pm \leq b_r^\pm, r = 1, 2, \dots, m_1 \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} a_{tj}^\pm x_j^\pm + \sum_{j=1}^{n_2} a_{tj}^\pm y_{jh}^\pm \geq w_h^\pm, t = 1, 2, \dots, m_2; h = 1, 2, \dots, s \quad (7)$$

$$x_j^\pm \geq 0, j = 1, 2, \dots, n_1 \quad (8)$$

$$y_{jh}^+ \geq 0, j = 1, 2, \dots, n_2; h = 1, 2, \dots, s \quad (9)$$

式中: f 是目标函数, c_j 是效益系数, x_j 是第一阶段的决策变量, ph 为概率水平, e_j 表示惩戒系数, y_{jh} 是第二阶段的决策变量, ar_j 、 at_j 是系数, br 是常数项, wh 是随机变量在概率 ph 下的取值, 并且 $\sum p_h = 1$ 。

1.4 模型构建

水权交易是实现水资源利用效益最大化、效率最优化的有效途径之一。初始水权分配立足于各地区现状用水情况, 以稳定的社会秩序为背景, 继承现实的水资源分配格局。初始水权建模主要涵盖交易主体的选择、交易市场的构建、交易行为的实现条件及交易机制的确立等方面。

1) 初始水权模型

目标函数: 目标函数满意度最大化, 包括尊重现状和高效性两条原则, 见式 (10)。

$$\text{Max } f = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (p_k \times HD_{kt}^+) \quad (10)$$

约束条件:

①尊重现状原则: 尊重现状用水、维持现有的分配格局, 能够在一定程度上降低水资源的大规模调整带来的社会冲突^[32]。尊重现状用水是在充分考虑未来用水需求的基础上, 对已形成的水资源利用格局进行认可、界定、导向并逐步规范, 建立促进用水结构优化的水权流转机制, 以及生活用水、农业用水和生态环境用水底线的保障机制。保护大多数用水主体的合法用水权益, 减少大规模重新分配引起的利益冲突, 有利于促进人们在初始水权分配中的自发合作, 从而保障水权分配的合理性和公平性, 见式 (11)、(12)。

$$\frac{WNA_{zat}^+}{WRama_{zat}} \geq HDW_{kt}^+ \quad (11)$$

$$HD_{kt} \leq HDW_{kt} \quad (12)$$

②高效性原则: 在有限的水资源总量条件下, 不同的行业在用水过程中会产生经济效益各不相同, 优先保障水权满足于高收益行业, 见式 (13)、(14)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \left[\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A (WQA_{zat} \times BA_{za}^+) \right] \\ - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A (P_k \times WLA_{zakt}^+ \times DA_{za}^+) \right] \\ - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A (P_k \times WPA_{zakt}^+ \times FAWA_{za}) \right] \end{array} \right\} \geq \frac{FMAX_{kt}^+}{HDE_{kt}^+} \quad (13)$$

$$HD_{kt}^+ \leq HDE_{kt}^+ \quad (14)$$

③生产规模约束: 保证正常生产所需水量等于目标用水量; 每个用户的实际生产应小于最大生产规模, 大于最小生产规模, 见式 (15)~(17)。

$$QSA_{zat} = WQA_{zat} \times LWPA_{za} \quad (15)$$

$$PSA_{zakt}^+ = WPA_{zakt}^+ \times LWPA_{za} \quad (16)$$

$$PSAmi_{zat} \leq PSA_{zakt}^+ \leq PSama_{zat} \quad (17)$$

④用水量约束: 约束实际用水量与目标用水量之间的关系; 保证用户初始水权的分配量, 见式 (18)、(19)。

$$WPA_{zakt}^+ = WQA_{zat} - WLA_{zakt}^+ \quad (18)$$

$$WPA_{zakt}^{\pm} \leq WNA_{zat}^{\pm} \quad (19)$$

⑤水量平衡约束：保证流域内地表可用水量与用户初始水权之间水量平衡，包括保障河流的生态需水量和水力发电用水。通过地表水资源模拟预测，获得流域不同水文年天然径流量数据，从天然径流量中扣减河流的生态需水量和水力发电用水量，从而得到地表可用水量资源量，模型中设置的初始水权量始终小于地表可用水量资源量，优先保障了河流的生态需水量和能源需求，见式 (20)、(21)。

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A WNA_{zat}^{\pm} \leq SAWR_{kt} \quad (20)$$

$$SAWR_{kt} = RNF_{kt} - REW_{kt} - S WEG_{kt} \quad (21)$$

⑥非负约束：各决策变量非负，见式 (22)。

$$HD_{kt}^{\pm}, HDW_{kt}^{\pm}, HDE_{kt}^{\pm}, WQA_{zat}, WPA_{zat}^{\pm}, WLA_{zakt}^{\pm}, QSA_{zat}, PSA_{zat}, WNA_{zat}^{\pm}, PNA_{zat}^{\pm}, SAWR_{kt} \geq 0, \forall z, a, k, t \quad (22)$$

2) 水权交易模型

初始水权分配的目标是保障区域内各用水部门或行业公平协调发展，达到预期的发展规划目标。而水权交易则是为了最大限度的提高流域或区域水资源利用效率，提高系统整体效益^[33]。初始水权分配是进行水权交易的基础，也是在水权制度建设过程中的重要环节。水权交易是初始水权分配结果的继承，也是在水权初始分配不能满足资源配置需求时，利用市场机制对资源进行进一步优化的手段。保证水权初始分配的合理不仅关系水权交易市场能否良性运行，还直接影响社会公平和稳定，通过明晰水权，为后续的水权交易和促进地区间水资源优化配置奠定基础。

目标函数：上层目标函数为系统效益最大化，包括用户收益、缺水成本、水权交易成本和水费。下层目标函数为系统用水量最小化，为用户实际用水量。

上界见式 (23)。

$$\begin{aligned} \max f^{\pm} = & \sum_{t=1}^T \left[\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A (WQA_{zat} \times BA_{za}^{\pm}) \right] - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A (p_k \times WLA_{zakt}^{\pm} \times DA_{za}^{\pm}) \right] \\ & - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A (p_k \times B WTA_{zat}^{\pm} \times TCA_{za}) \right] \\ & - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A (p_k \times WPA_{zakt}^{\pm} \times FAWA_{za}) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

下界见式 (24)。

$$\min f^{\pm} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A p_k \times WPA_{zakt}^{\pm} \quad (24)$$

约束条件：

①生产规模约束：保证正常生产所需水量等于目标用水量；每个用户的实际生产应小于最大生产规模，大于最小生产规模，见式 (25)~(27)。

$$WQA_{zat} = QSA_{zat} \times LWPA_{za} \quad (25)$$

$$PSA_{zakt} = WPA_{zakt}^{\pm} \times LWPA_{za}^{\pm} \quad (26)$$

$$WPAmi_{zat} \leq WPA_{zat}^{\pm} \leq WP Ama_{zat} \quad (27)$$

②用水量约束：约束实际用水量与目标用水量之间的关系；保证用户交易后水权的分配量，见 (28)~(29)。

$$WPA_{zakt}^{\pm} = WQA_{zat} - WLA_{zakt}^{\pm} \quad (28)$$

$$WPA_{zakt}^{\pm} \leq TWNA_{zat}^{\pm} \quad (29)$$

③水权交易规则约束：保证用户之间水权交易买卖量的平衡，避免多卖少买，见 (30)~(32)。

$$TWNA_{zat}^{\pm} = WNA_{zat}^{\pm} + BWTA_{zat}^{\pm} - SWTA_{zat}^{\pm} \quad (30)$$

$$WNA_{zat}^{\pm} \geq SWTA_{zat}^{\pm} \quad (31)$$

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A SWTA_{zat}^{\pm} = \sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A BWTA_{zat}^{\pm} \quad (32)$$

④污染物排放量约束：保证流域内纳污量均不大于其环境容量，避免导致流域污染，见式 (33)。

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A (UWEA_a \times WPA_{zakt}^{\pm}) \leq PEC_t^{\pm} \quad (33)$$

⑤水权交易价格约束：保证在用户非交易期间收益要小于交易期间的收益，见式 (34)。

$$\begin{aligned} WQA_{zat} \times BA_{za}^{\pm} - WLA_{zakt} \times DA_{za}^{\pm} + (SWTA_{zat}^{\pm} \times TRA_{za}) \\ - [BWTA_{zat}^{\pm} \times (TCA_{za} + TRA_{za})] - WPA_{zakt}^{\pm} \times FAWA_{za} \geq NTGA_{zakt}^{\pm} \end{aligned} \quad (34)$$

⑥地表水取水约束：保证流域内地表可用水量与用户初始水权之间水量平衡，包括河流的生态需水量和发电用水供应量，见式 (35)、(36)。

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{a=1}^A TWNA_{zat}^{\pm} \leq SAWR_{kt} \quad (35)$$

$$SAWR_{kt} = RNF_{kt} - REW_{kt} - S WEG_{kt} \quad (36)$$

⑦供需制约：如果预期用水量大于初始水权，则两者之间的差值为水权需求量。如果初始水权大于预期用水量，二者差值为水权供给量，见式 (37)、(38)。

$$DWA_{zakt}^{\pm} = \begin{cases} WPA_{zakt}^{\pm} - WNA_{zat}^{\pm}, & \text{if } WPA_{zakt}^{\pm} - WNA_{zat}^{\pm} > 0 \\ 0, & \text{if } WPA_{zakt}^{\pm} - WNA_{zat}^{\pm} \leq 0 \end{cases} \quad (37)$$

$$SWA_{zakt}^{\pm} = \begin{cases} WNA_{zat}^{\pm} - WPA_{zakt}^{\pm}, & \text{if } WNA_{zat}^{\pm} - WPA_{zakt}^{\pm} > 0 \\ 0, & \text{if } WNA_{zat}^{\pm} - WPA_{zakt}^{\pm} \leq 0 \end{cases} \quad (38)$$

⑧非负约束：各决策变量非负，见式 (39)。

$$\begin{aligned} WQA_{zat}, WPA_{zat}^{\pm}, WLA_{zakt}, QSA_{zat}^{\pm}, PSA_{zat}^{\pm}, TWNA_{zat}^{\pm}, \\ BWTA_{zat}^{\pm}, SWTA_{zat}^{\pm}, SAWR_{kt}, DWA_{zakt}^{\pm}, SWA_{zakt}^{\pm} \geq 0, \forall z, a, k, t \end{aligned} \quad (39)$$

2 结果与分析

2.1 气候情景设置

运用假定气候情景法构建不同的气候模式，基于未来不同降雨和温度梯度设置了 25 种气候变化情景，P (mm)、T (°C) 分别为原始的降水量和温度，同时改变马哈韦利河流域内的历史气温和降水数据，并将其进行一一组合，形成 25 种不同类型的气象情景。详细气候情景模式见表 1。

气候变化情景下，系统平均效益为 $[51, 56] \times 10^9$ 卢比，其中 M_{25} 、 M_{45} 和 M_{55} 的系统效益最大，从降水量上可知，系统效益随着降水量的增多而增加。由此可见，水是生产之要，水权交易系统的综合效益决定于水权总量，即可用水量资源量。

表 1 组合气候情景模式设计

Table 1 Combined design of different climate scenario models

气温变化/ °C	降水变化/mm				
	P×(1-20%)	P×(1-10%)	P	P×(1+10%)	P×(1+20%)
T-2	M11	M12	M13	M14	M15
T-1	M21	M22	M23	M24	M25
T	M31	M32	M33	M34	M35
T+1	M41	M42	M43	M44	M45
T+2	M51	M52	M53	M54	M55

2.2 初始水权量分析

对于马哈韦利河流域，其农业用水量相对其他类型用水较大，初始水权分配对农业用水量覆盖面较多。图 2 展示了 25 种气候变化情景下初始水权分配方案。结果表明，随着气候变化的影响，降水作为地表径流产生的最直接来源，降水量的增加势必会引起径流量的增加，使流域的水资源量增大，整体上初始水权分配总量随之增加。其中， M_{15} 和 M_{35} 情景下，当降水量达到最高水平，初始水权分配总量并未达到最大，这是因为为了提高供水安全，初始水权分配以枯水年水资源量为总水量进行分配，枯水年的供水安全能够得到保障的话，平水年和丰水年的初始水权分配也将得到合理规划。

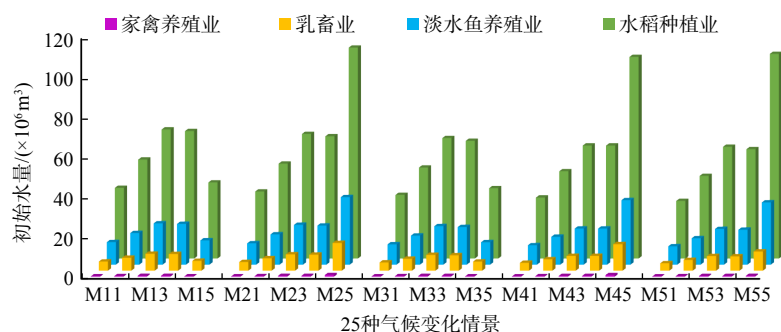


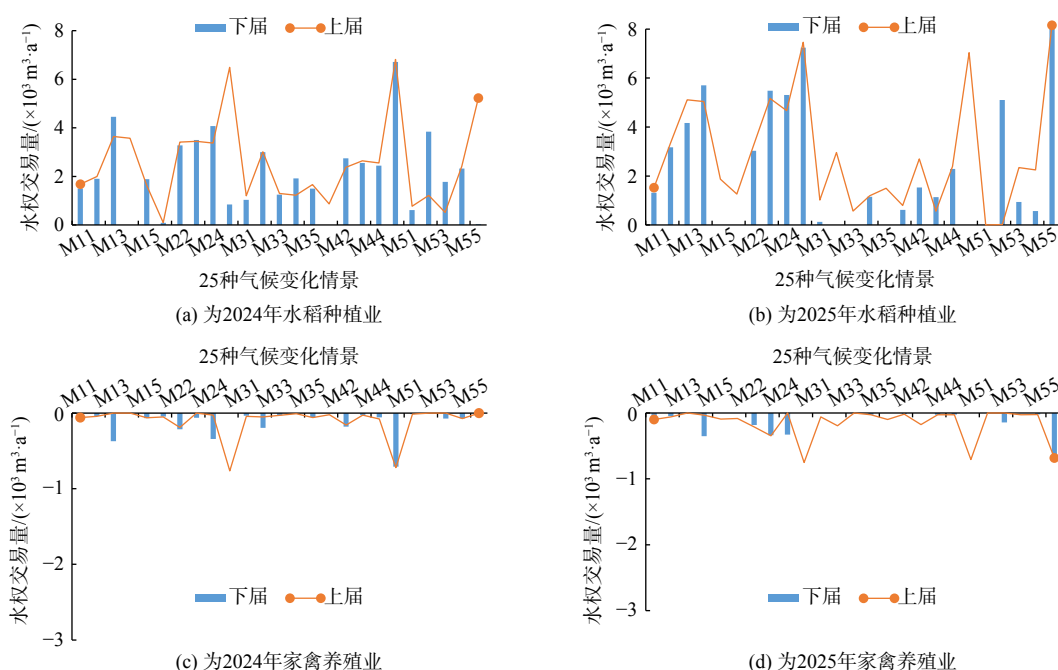
图 2 气候变化情景下不同行业初始水权分配量

Fig. 2 Initial water right allocation for different industries under climate change scenarios

同时，气温升高会导致地表水蒸发量变大、土壤蒸发及植物蒸腾量增加^[34]，水资源的完整性和稳定性发生变化，给水资源分配带来一定的压力，总体上初始水权总量减少，例如， $T+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下平均初始水权总量比 $T+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下平均初始水权总量多 3.10%。对于不同行业，水稻种植业分配的初始水权量最大，平均占比为 68.60%，这是因为初始水权分配模型通过模拟当前经济条件下流域所承载农业生产规模描述尊重现状原则^[35]，较高的现状生产规模是水稻种植业初始水权较多的原因。

2.3 水权交易量分析

图 3 展示了 25 种气候变化情景下两个规划期四个行业的水权交易量。结果表明，在水权交易量上，规划期二的水权交易总量为 $[56.89, 72.19] \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ，规划期一的水权交易总量为 $[53.29, 63.21] \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ，



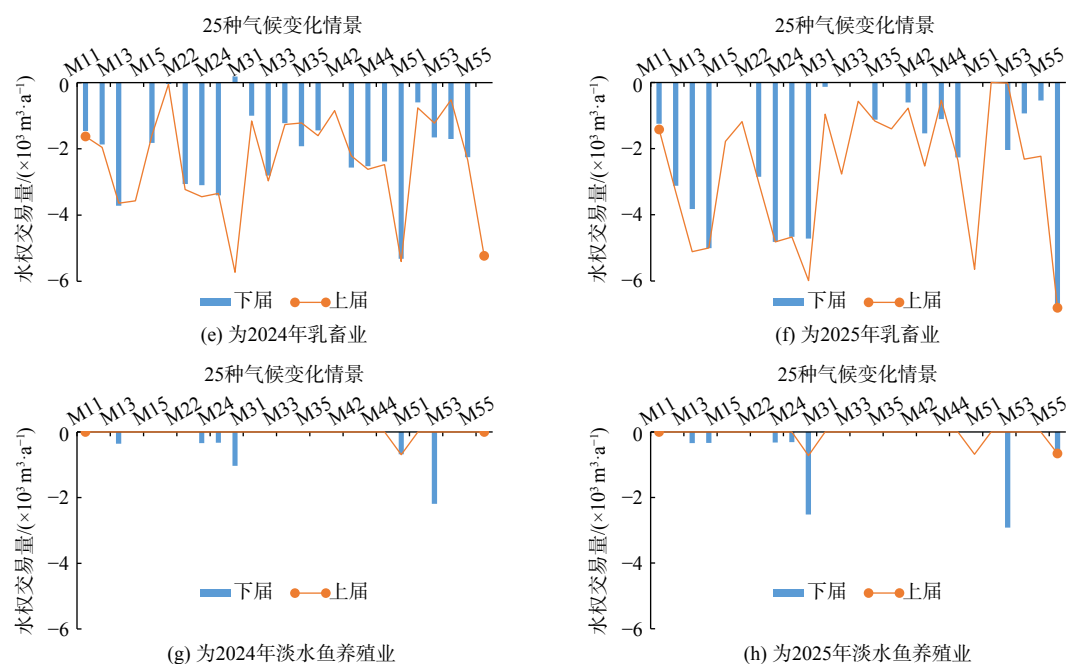


图 3 气候变化情景下不同行业水权交易量

Fig. 3 Volume of water rights in different industries under climate change scenarios

规划期二（2025 年）水权交易总量比规划期一（2024 年）水权交易总量多 19%。这是因为初始水权分配模型充分考虑农业 GDP 增速，各行业生产规模随 GDP 增加而提高，行业用水量也随之增加，水权需求增长，水权买卖得到刺激，促进水权交易市场活力，故水权总交易量增加。同时，在模型的经济效益最大化和实际用水量最小化的双重目标导向下，水权倾向于流向单位用水效益高的行业，水稻种植业用水效益整体上高于其他行业，故水稻种植业为主要买家，水权交易量为 $[55.09, 67.70] \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ，其余行业为卖家，其中乳畜业为卖家，水权交易量为 $[-46.47, -63.20] \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ，水权出售量占总水权出售量的 89%。

上述结果表明，水权需求量和供给量共同驱动着用户的水权交易行为，在交易买卖双方，两个规划期中卖方用户均为家禽养殖业、乳畜业和淡水鱼养殖业，且种植业均为主要买家；这是因为为了保障流域水生态环境质量，所开发水权交易模型考虑环境容量约束，家禽养殖业、乳畜业和淡水鱼养殖业 3 个排污行业生产规模及用水量受到制约，故其有多余初始水权量可出售；种植业初始水权少且需水量多，通过大量购买社会生产用水权以保障其生态需水，并且水稻种植业不排放 COD，而流域有粮食需求，因此该行业需扩大生产规模，这导致需水量增加，故水稻种植业成为主要水权买方。水权交易市场可以驱动水权从低效益用户转向高效益用户，进而有效地提高水资源的利用效率。

2.4 各行业持有水权量分析

图 4 为 25 种气候变化情景下区间形式的水权配置结果，结果反映了交易后各行业持有水权量。结果表明，水稻种植业水权量最大，其次为淡水鱼养殖业，家禽养殖业用水最小。 M_{33} 情景下，水稻种植业水权量为 $[45.07, 46.77] \times 10^6 \text{ m}^3$ ，淡水鱼养殖业的水权量为 $[10.91, 16.39] \times 10^6 \text{ m}^3$ ，2 者用水量占了总用水量的 89%。水稻种植业持有水权最多是流域对水稻粮食需求量大导致的。水稻种植业交易之后的平均目标用水量为 $42.21 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，占总用水量的 68%，小于其交易之前目标用水量，这是水稻种植业买入水权，增加水权持有量的结果。可以反映出水稻种植业为满足社会需求可能存在一定的水资源缺口，在水权交易体系下，水稻种植业可以通过买入水量的方式满足生产，为流域系统带来高的经济效益。

2.5 不同县持有水权量分析

图 5 为马哈韦利河流域内 7 个县不同气候情景下的水权配置结果。结果表明，波隆纳鲁沃县持有水权量最大，平均持有水权量占总量的 39%，各区域持有水权量直接决定了农业生产的水平，所以该县的生产规模也较大，例如，其水稻种植业占流域总量的 57%，家禽养殖业、乳畜业和淡水鱼养殖业依次为 19%、30%、

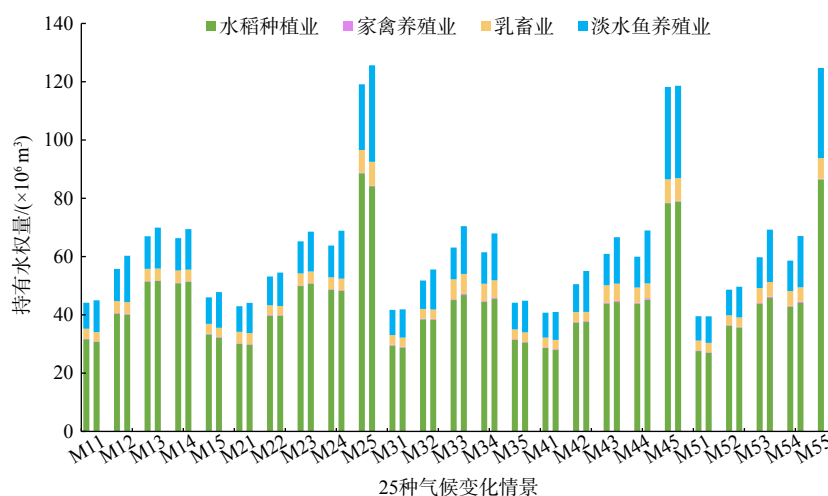


图 4 气候变化情景下不同行业持有水权量

Fig. 4 Different industries hold water rights under climate change scenarios

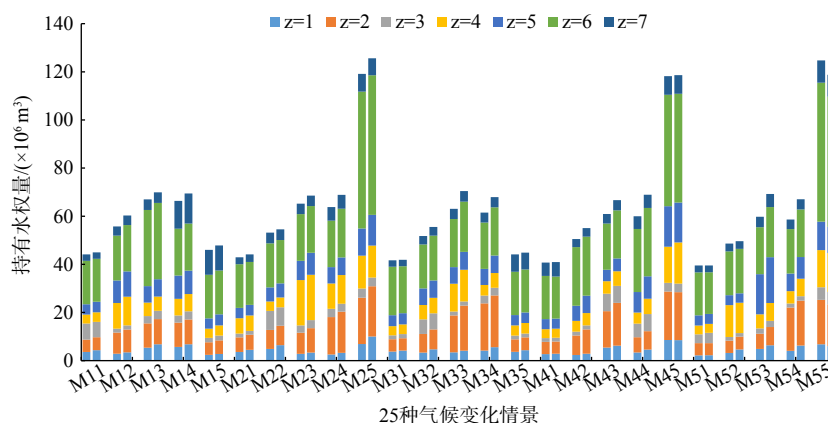


图 5 气候变化情景下不同县持有水权量

Fig. 5 Different counties hold water rights under climate change scenarios

28%，优化水资源配置可以促进农业的丰产增收，实现流域范围内水量的有序配置和高效流转^[36]。由图可知，不同气候变化情景下，M₂₅、M₄₅和M₅₅中各县持有水权量都较高，首先是因为部分地区的农户过于强调农作物的产量、经济效益水平，忽略水资源的节约和控制，导致出现严重的水资源损耗问题，其次，这三个气候情景下的初始水权分配较大，所以持有水权量较高。节约农业生产的水资源应用量，避免出现不必要损失和浪费的问题^[37]，这样不仅能够促使农业生产效果的提升，能避免水资源过多损耗而导致生态环境受到影响。

2.6 COD 排污量分析

图 6 为马哈韦利河流域在 25 种气候变化情景下 7 个县 COD 排污量。结果表明：在不同县中，安帕赖县、马塔莱县、亭可马里县这 3 个县的排污量相对来说比较小，其中，安帕赖县的排污量最小（占总量的 3%），其平均排污量为 16.31 t·a⁻¹，一方面是由于区域的经济发达，污水处理技术相对成熟，排污量随即减少；另一方面是因为该县的社会生产实际用水总量小于其他县，实际生产规模低，排污量也随之降低。波隆纳鲁沃县的排污量最大，其平均排污量为 159.24 t·a⁻¹，占平均排污总量的 28%，这是因为为了保障社会生产需求，家禽养殖业、乳畜业和淡水鱼养殖业生产规模比其它区县大，分别占总县的 91%、83% 和 78%，故排污量大。在多种气候情景中，M₂₅、M₄₅和M₅₅排污总量最大，因为上述 3 个气候情景下水权交易增加用户的水权持有量，初始水权量分配的多，水资源充足，在水权交易模型高效益目标导向下^[38]，行业生产规模增加，伴随着排污量增多。

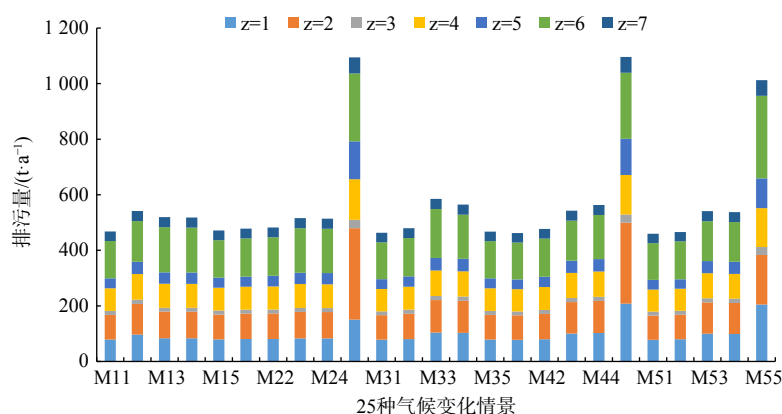


图6 气候变化情景下不同县的排污量

Fig. 6 Discharge volumes in different counties under climate change scenarios

3 结论

“一带一路”国家多为发展中国家，经济发展水平不高，农业依然是他们关系到国计民生的基础产业，而水是最短缺的农业重要资源之一，也是制约农业可持续发展的关键因素。通过农业水权交易，可以使水权成为一项具有市场价值的流动性资源，促使流域内用水效率低的用户考虑用水的机会成本而节约用水，并把部分水权转让给用水边际效益大的用户，使新增或潜在用户有机会取得所需水资源，从而达到提升社会用水总效率的目的。同时完善水权交易市场规则，实现交易数据的融合利用，促进流域-区域-行业-用水户之间形成更加优化的水资源分配策略。本研究利用水权交易的这一优势，针对马哈韦利河流域的水资源供需不平衡的问题，通过开展马哈韦利河流域多气候变化情景下地表水资源模拟预测，获得不同来水年型来水量，构建区间双层两阶段随机农业水权交易决策模型系统，研究不同气候情景条件下多用户的流域水资源适用性管理决策方案。得到以下结论。

1) 初始水权基于地表可用水资源总量进行分配，气候变化影响地表可用水资源量，从而影响初始水权分配结果。初始水权总量整体上呈现随降水增加而增加，随温度升高而降低的规律，且在温度越低，降水量越高的条件下，初始水权变化越大。

2) 在水权交易中，规划期二（2025年）水权交易总量比规划期一（2024年）水权交易总量多19%；水权倾向于流向单位用水效益高的行业，水稻种植业用水效益整体上高于其他行业，故水稻种植业为主要买家，家禽养殖业、乳畜业和淡水鱼养殖业为卖家，其中乳畜业为主要卖家，不排污行业生产规模不受环境容量限制，故倾向于买入水权以扩大生产规模。

3) 水权交易过后，在行业上，水稻种植业持有水权量最多，其次依次为淡水鱼养殖业、乳畜业、家禽养殖业；在区县上，波隆纳鲁沃县持有水权量最大，巴杜勒县次之，因为流域对不同行业产量的需求量不同，不同区域的生产规模也不同。在 M_{25} 、 M_{45} 和 M_{55} 情景中各行业和各县持有水权量都较高，这是初始水权量分配大的结果。

4) 气候变化情景下，波隆纳鲁沃县的COD排放量最大，其平均COD排放量为 $159.24 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，安帕赖县的排污量最小，在水权交易模型高效益目标导向下，行业生产规模增加，伴随着排污量增多。气候通过改变可利用水资源量，影响初始水权分配，同时影响着二次水权配置和污染排放。

参考文献

- [1] 王旭, 靳炜, 刘娟, 等. 全球新格局下中国开展水科技国际合作的背景、模式与未来展望[J]. 环境工程学报, 2020, 14(8): 2066-2074.
- [2] 尤立, 齐天杰, 张俊龙, 等. 斯里兰卡贾夫纳半岛饮用水水质分析及对策建议[J]. 四川环境, 2023, 42(3): 270-279.
- [3] 曾令武, 朱洪涛, 王振北, 等. 我国华北地区城市水生态环境现状分析及综合整治对策[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4149-4161.
- [4] 邱华盛, 周强, 杨敏. “政产学研”联手共建“一带一路”——中斯合作建设“惠民、暖心”的洁水工程[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(4): 382-386.
- [5] 曾雪婷, 李永平. 不确定性规划在水资源管理中的运用与优势[J]. 水利发展研究, 2013, 13(7): 37-39.
- [6] WITHANACHCHI S S, KÖPKE S, WITHANACHCHI R C, et al. Water resource management in dry zonal paddy cultivation in Mahaweli River Basin, Sri Lanka: An analysis of spatial and temporal climate change impacts and traditional knowledge[J]. Climate, 2014, 2(4): 329-354.

- [7] 吴丽, 周惠成. 基于合作博弈的水权交易模型研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 53-58.
- [8] 王丽珍, 黄跃飞, 王光谦, 等. 巴彦淖尔市水市场水权交易模型研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 81-87.
- [9] WANG G, ZHANG X, DU L, et al. Study on the optimal allocation of water resources based on the perspective of water rights trading[J]. *Sustainability*, 2023, 15(23): 16214.
- [10] 谢文静, 郝成伟, 张俊龙, 等. 自然湿地参与的大沽河流域水权交易模型[J/OL]. 生态学杂志, 1-13. (4-03-6.)
- [11] ZAMAN A M, MALANO H M, DAVIDSON B. An integrated water trading-allocation model, applied to a water market in Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(1): 149-159.
- [12] 裴源生, 李云玲, 于福亮. 黄河置换水量的水权分配方法探讨[J]. 资源学, 2003(2): 32-37.
- [13] 戎丽丽, 毕康蕾, 胡继连. 农用水权期权交易的触发机制研究[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(2): 10-27.
- [14] ZHANG J L, LI Y P, YOU L, et al. Optimizing effluent trading and risk management schemes considering dual risk aversion for an agricultural watershed[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107716.
- [15] 陈义忠, 卢宏伟, 李晶, 等. 基于不确定性的水资源配置双层模型及其实证研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2252-2261.
- [16] ACUNA J A, DANIELA C, RODRIGO M, et al. A two-stage stochastic game model for elective surgical capacity planning and investment[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2024, 91: 101786.
- [17] BEKCHANOV M, RINGLER C, BHADURI A. A water rights trading approach to increasing inflows to the Aral Sea[J]. *Land Degradation Development*, 2018, 29(4): 952-961.
- [18] 李东林, 左其亭, 马军霞. 基于不确定性双层规划的水资源配置及和谐评价[J]. 北京师范大学学报, 2020, 56(3): 350-360.
- [19] 赵雷, 孙世军, 冯江, 等. 不确定性条件下的波罗湖湿地补水工程净碳汇优化模型研究[J]. *可再生能源*, 2020, 38(5): 569-577.
- [20] BEKRI E, DISSE M, YANNOPOULOS P. Optimizing water allocation under uncertain system conditions in Alfeios River Basin (Greece), Part A: Two-stage stochastic programming model with deterministic boundary intervals[J]. *Water*, 2015, 7(10): 5305-5344.
- [21] DAI Z, LI Y. A multistage irrigation water allocation model for agricultural land-use planning under uncertainty[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 12969-12979.
- [22] GUO P, HUANG G H, ZHU H, et al. A two-stage programming approach for water resources management under randomness and fuzziness[J]. *Environmental Modeling and Software*, 2010, 25(12): 1573-1581.
- [23] 李小明, 何理, 卢宏伟. 基于模糊可信度约束的不确定性农业水资源规划模型研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(4): 108-114.
- [24] 张成龙, 郭萍, 赵建明. 不确定条件下的区间两阶段模糊可信性约束规划配水模型研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(8): 97-101.
- [25] 周晗. 基于 Sentinel1/2 的斯里兰卡洪涝淹没范围提取研究[D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [26] 邱凤婷, 过志峰, 张宗科, 等. 基于改进 SVM 分类法的 SAR 图像水体面积提取研究[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(5): 940-948.
- [27] 张昱, HAMIDIAN A H, 刘超, 等. 伊朗水与环境领域面临的主要问题及中伊科技合作进展[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(8): 2081-2088.
- [28] 卢路, 朱晓红. 灌溉水量分配的公平性——以斯里兰卡马哈韦利河开发项目为例[J]. *水利水电快报*, 2016, 37(2): 14-19.
- [29] 齐天杰. 气候变化背景下热带海岛河流径流响应研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [30] WANG W W, ZHOU H W, ZHANG H J. Transboundary water resource allocation under drought emergencies: A multistage bilevel programming model considering decision-makers' risk perception[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 148: 110888.
- [31] MEHRI R, JAVAD H, ALI M G. An uncertainty-based random boundary interval multi-stage stochastic programming for water resources planning[J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(12): 4571-4587.
- [32] 张晓微. 沉湖湿地初始水权分配研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [33] 靳玉莹, 赵勇, 张金萍, 等. 基于多目标优化模型的承德市初始水权分配[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(1): 156-159.
- [34] 吴普特, 赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 1-6.
- [35] 王宗志, 胡四一, 王银堂. 基于水量与水质的流域初始二维水权分配模型[J]. *水利学报*, 2010, 41(5): 524-530.
- [36] 赵英, 王海霞, 王毅, 等. 黄河流域农业水资源高效利用与优化配置研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(4): 158-168.
- [37] 付跃超. 农业用水水权现状浅析[J]. *农村经济与科技*, 2018, 29(14): 198-199.
- [38] YE W, LIU L X, ZHANG B. Designing and implementing pollutant emissions trading systems in China: A twelve-year reflection[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261(C): 110207.

(责任编辑: 金曙光)

Research on agricultural water rights trading in the Mahaweli River Basin of Sri Lanka under uncertainty

LIU Mei^{1,2}, YOU Li^{2,*}, HU Chunming², HAO Wenlong^{1,*}

1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. National Engineering Research Center of Industrial Wastewater Detoxication & Resource Recovery, Beijing 100085, China

*Corresponding author, E-mail: liyou@rcees.ac.cn; hwl5022202@163.com

Abstract In the process of water resources utilization, water right trading can promote the subjects with low water use efficiency to transfer water rights to the subjects with high marginal water use benefit, thereby realize maximize the overall benefit of the region. As an important node country of the "Belt and Road" initiative. The Mahaweli River basin in Sri Lanka was selected as the survey region to constructing the agricultural water rights trading model based on the interval two-stage stochastic bi-level uncertainty planning method, and dealing with the indeterminacy of socio-economic data, the randomness of surface water resources and the multi-objective of the system. The research revealed that the initial total water rights were affected by climate change, which positively correlated with precipitation and negatively correlated with temperature. In addition, in the water rights transaction, rice planting industry was the main buyer, and dairy and livestock industry was the main seller. After the water rights transaction, the industries and regions holding the largest amount of water rights were rice planting industry and Polonnaruwa County, wherein the initial water rights allocation had a significant influence on the water rights holding. The research results can improve the scientific management of water resources in the Mahaweli River basin under the changing climate, and gradually create a positive pattern of water resources management and water rights distribution.

Keywords uncertainty; water rights trading; Sri Lanka; Mahaweli Basin; water resources management