

流域上下游水资源与水污染冲突评估 ——基于水足迹-粗糙集理论

薛英岚¹, 陈岩², 曾维华¹

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘要:将水足迹理论引入流域上下游间用水和排污冲突评估,通过蓝水足迹和灰水足迹表征区域社会经济发展中用水和排污的需求,并进一步得到蓝水和灰水足迹的可持续性,用来代表流域水环境承载状态。最后基于粗糙集理论,量化流域内用水、排污的整体冲突局势和上下游区域间的冲突大小,作为流域未来水资源和水环境规划的依据。以青海省湟水河流域为例,将该方法体系应用于其上下游冲突评估。结果显示,在 2011—2015 年流域水环境整体冲突局势为中等且趋势较为稳定,水资源在干旱年(2013 年)冲突较大。位于下游的西宁市区,与上游和中游各区域冲突均较为显著,是未来规划中需要考虑的重点。

关键词:冲突评估;水足迹;粗糙集;湟水流域

中图分类号:X321

文献标志码:A

文章编号:1003-9511(2020)06-0043-07

流域以其得天独厚的资源、地理优势,成为各地区经济和产业发展的核心。但流域本身的整体性和人为行政区划分割之间的矛盾、水资源利用和水污染排放的外部性,使得流域内各级地方政府在水资源分配、水污染治理上难以达到有效合作^[1-2],加剧了流域水资源短缺和水环境污染的问题。流域上下游地区间冲突的识别与评估,是在流域层面对水资源分配与水污染治理矛盾进行协调和解决的关键^[3]。

目前流域上下游冲突识别与评估主要可分为模糊综合评价-层次分析法(Fuzzy Comprehensive Assessment-Analytic Hierarchy Process, FCA-AHP)、基于博弈理论的流域冲突分析法、F-H 冲突分析法、图模型(GMCR)方法和冲突中多主体仿真方法,多为水资源或水污染单方面的研究。

a. FCA-AHP 法侧重于冲突风险的评估,首先从流域水量、水质、生态环境和管理体制等方面建立指标体系,通过 AHP 法确定权重系数,再采用模糊综合评价方法评估冲突风险的隶属度,确定流域上下游冲突的风险等级。胡庆和等^[4]采用 FCA-AHP 法建立非线性模型对资水流域进行水资源冲突风险

评估,结果显示该流域冲突风险等级为中等,人均用水量偏低,水权界定不明晰。FCA-AHP 法通过评价指标体系可对流域冲突的影响因素进行全面考虑,但在评估过程中权重确定较为主观,且无法反映上下游的冲突类型和程度。

b. 基于博弈论的流域冲突分析法,根据博弈模型可分为演化博弈^[5]、非合作动态博弈^[6]和完全合作博弈^[7]等。通过对多种情况下(多个用水户情景、完全信息情景、公用水权模式等)各利益相关者收益的分析,从不同角度对流域上下游以及不同部分间的水资源分配、水污染治理冲突进行判定,为后续达到均衡条件提供依据。基于博弈论的流域冲突分析法根据博弈论中不同的均衡条件,可有效对冲突的协调、缓解提出科学的解决方案,但由于大多数博弈模型均为非合作的一次性(one-shot)模型,而现实中流域利益相关者间的博弈具有长期和经常性的特征,此外流域内水资源、水质都具有动态变化特性,而博弈模型未能考虑其输水、治水中的时间因素。

c. F-H 冲突分析法是从亚对策分析法基础上发展而来,于 1979 年由 Fraser 和 Hipel 提出^[8],之

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0506403)

作者简介:薛英岚(1990—),男,博士研究生,主要从事环境规划与管理研究。E-mail: xueyinglan@mail.bnu.edu.cn

通信作者:曾维华(1965—),男,教授,主要从事环境评价、规划与管理研究。E-mail: zengwh@bnu.edu.cn

后逐渐应用于流域水资源管理等领域^[9-11]。F-H 冲突分析法包括建模和稳定性分析:建模确定冲突涉及的局中人及其策略集,由此确定冲突的可行局势和偏好向量;稳定性分析通过一定的逻辑原则确定各局中人的局势稳定性,为冲突平衡提供依据。在 F-H 冲突分析法以表格形式表达的基础上, Hipel 等^[12-13]提出冲突分析的图模型(GMCR),并拓展了其在流域冲突管理中的应用。F-H 和 GMCR 分别以表和图的形式表达冲突,基于对未来情况的逻辑分析对冲突进行识别和判断,但无法对利益相关者间的冲突程度做出评估^[14],缺乏具体量化冲突的指标。近年来,随着模拟仿真科学的不断进步,多主体(multi-agents)冲突分析方法逐渐被应用于环境管理和流域规划中,包括基于元胞自动机(CA)和基于强互惠理论的冲突分析法^[15-16],通过对政府 Agent 和用水 Agent 行为偏好的模拟,对不同 Agent 间诉求冲突进行模拟和协调。多主体冲突分析方法可以更加全面细致地考虑不同利益相关方的关系和期望,但在实际模拟过程中,对 Agent 决策偏好的制定较为主观,并缺乏对不同地区资源禀赋的考虑。

由此可见,针对流域水资源利用和水环境保护上下游权责冲突,目前的水资源和排污负荷分配冲突研究一方面对分配原则的指标和上下游决策考虑较为主观,另一方面对流域内水质、水量的关联及其动态变化考虑不全面。本文将水足迹理论引入流域上下游冲突评估体系中,在水足迹框架下考虑流域不同区域水资源禀赋与水质现状,基于粗糙集理论对流域不同利益相关方的水资源分配和水污染之间的冲突进行程度量化。通过核算蓝水和灰水足迹的可持续性,从客观上表征上、下游区域对既有分配方案的认同和偏好态度。此外,水足迹以自然径流量和实际径流量反映水资源和水环境的承载能力,充分考虑了水质、水量的相关性及其动态变化,可以为流域规划和生态补偿等相关冲突协调制度提供更加客观和科学的依据。

1 基于水足迹-粗糙集的流域冲突评估方法

1.1 水足迹理论与核算方法

水足迹(water footprint, WF)理论以虚拟水(virtual water)为理论基础,由 Hoekstra 等^[17]于 2002 年提出,指一定范围内(某区域或某些人口)在一定时间内消耗的所有产品和服务所需要的水资源量。水足迹以水量为单位,包括绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹三方面^[18-21]。其中,绿水足迹指植被的雨水总蒸散量与储存在农作物或林木内水分之和;蓝水足迹指生产产品或提供服务过程中所消

耗的水资源量;灰水足迹指以水质标准为基准,将生产过程中产生的污染负荷稀释与同化所需的水资源量。

本文以蓝水足迹表征流域水资源的利用与供给,以灰水足迹表征流域水污染物排放与水环境质量。与传统的取水量、排污量等指标相比,水足迹可以从“需求”的角度核算流域上下游地区社会经济发展的资源需求量^[22]。传统的核算口径表征的区域往往为基于现状,其需求可能未得到充分的满足;此外,水足迹可以从资源可获取量角度,将流域的水质和水量联系起来,并通过引入环境基础流量(environmental flow requirement, EFR),在分配上下游水资源时考虑水生态因素^[23]。

1.1.1 流域上下游区域水足迹核算方法

1.1.1.1 蓝水足迹

根据区域的用水结构,将蓝水足迹分为种植业、畜牧业、工业、居民生活 4 个部门。其中,居民生活又分为城镇居民生活和农村居民生活两部分。区域蓝水足迹核算为

$$\begin{cases} F_{\text{Blue-farm}} = \sum_i (E_{\text{TC},i} - Q_{\text{eff}})A_i \\ F_{\text{Blue-gra}} = \sum_j H_j M_j \\ F_{\text{Blue-ind}} = \sum_s H_s I_s \\ F_{\text{Blue-urpop}} = K_1 P_{\text{urban}} \\ F_{\text{Blue-rupop}} = K_2 P_{\text{rural}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{Blue-farm}}$ 、 $F_{\text{Blue-gra}}$ 、 $F_{\text{Blue-ind}}$ 、 $F_{\text{Blue-urpop}}$ 、 $F_{\text{Blue-rupop}}$ 分别为种植业、畜牧业、工业、城镇居民生活和农村居民生活的蓝水足迹; i 、 j 、 s 分别为种植农作物种类、养殖牲畜种类和工业产业种类; $E_{\text{TC},i}$ 为农作物 i 的单位面积生长需水量; Q_{eff} 为有效降水量; A 为农作物种植面积; H_j 为牲畜 j 的养殖耗水强度; M_j 为牲畜 j 的养殖规模; H_s 为单位工业增加值的耗水强度; I_s 为产业 s 的增加值; P_{urban} 和 P_{rural} 分别为区域城镇和农村人口; K_1 为城镇居民综合用水定额,表征城镇居民生活和第三产业的综合用水; K_2 为农村居民生活用水定额^[24]。

对于作物单位面积生长需水量 E_{TC} ,一般根据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)发布的 CROPWAT 模型确定:

$$E_{\text{TC},i} = K_{C,i} E_{T0} \quad (2)$$

$$\text{其中: } E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} v(p_a - p_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34v)}$$

式中: E_{T0} 为标准农作物的单位面积生长需水量,

m^3/m^2 ; Δ 为温度-饱和水气压曲线的斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; R_n 为地面净辐射蒸发当量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; γ 为温度计常数, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; T 为平均气温, $^\circ\text{C}$; v 为平均风速, m/s ; p_a 为饱和水气压, kPa ; p_d 为实际水气压, kPa ; $K_{c,i}$ 为农作物 i 的植物系数。

有效降水量 Q_{eff} 计算公式为

$$Q_{\text{eff}} = \begin{cases} (Q_{\text{month}}(125 - 0.2Q_{\text{month}})/125) & Q_{\text{month}} \leq 250 \text{ mm} \\ 125 + 0.1Q_{\text{month}} & Q_{\text{month}} > 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Q_{month} 为月降水量, mm 。根据蓝水足迹表征的内涵, 由于作物耕种期间每个生长周期的需水情况均不相同, 因此, 种植业蓝水足迹以月为单位进行核算, 再进行全年累加。

1.1.1.2 灰水足迹

与蓝水足迹类似, 区域灰水足迹也分为种植业、畜牧业、工业和居民生活 4 个部门。考虑了化学需氧量 (COD)、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 和总磷 (TP) 3 种污染物来计算灰水足迹, 并取其最大值作为实际灰水足迹, 表示为

$$\begin{cases} F_{\text{Grey-farm}} = \sum_i \frac{A_i U_i \theta_i}{C_S - C_{\text{nat}}} \\ F_{\text{Grey-gra}} = \sum_j \frac{Z_j M_j}{C_S - C_{\text{nat}}} \\ F_{\text{Grey-ind}} = \sum_s \frac{H_s I_s}{C_S - C_{\text{nat}}} \\ F_{\text{Grey-urpop}} = \frac{D_1 P_{\text{urban}} [(1 - \alpha_{\text{ur}}) + \alpha_{\text{ur}} \beta_{\text{ur}}]}{C_S - C_{\text{nat}}} \\ F_{\text{Grey-rupop}} = \frac{D_2 P_{\text{rural}} \lambda_{\text{rupop}}}{C_S - C_{\text{nat}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_{\text{Grey-farm}}$ 、 $F_{\text{Grey-gra}}$ 、 $F_{\text{Grey-ind}}$ 、 $F_{\text{Grey-urpop}}$ 、 $F_{\text{Grey-rupop}}$ 分别为种植业、畜牧业、工业、城镇居民和农村居民的灰水足迹; U 为作物的单位面积施肥量 (分为氮肥和磷肥) (种植业污染物包括 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP, 不含 COD); θ 为作物化肥流失系数; C_S 和 C_{nat} 分别为区域的水质目标和污染物本底值; Z 为单位养殖规模的排污量; M 为区域内养殖规模; H 为产业排污强度 (分为 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP); D_1 为城镇居民综合排污系数; D_2 为农村居民生活排污系数; α_{ur} 为区域内城镇生活污水收集率; β_{ur} 为城镇生活污水处理率; λ_{rupop} 为农村生活污水的入河系数, 不考虑农村生活污水的收集和集中处理。

1.1.2 流域上下游水足迹可持续性评估方法

在对流域内上下游区域的水足迹进行核算后,

借鉴水足迹可持续性评估的理念, 以蓝水足迹可持续性表征水资源的承载状态, 以灰水足迹可持续性表征水环境的承载状态。以上下游水资源和水环境承载状态的差异作为流域用水、排污冲突评估的依据。

1.1.3 基于蓝水足迹的水资源可持续性评价

在特定时间段 t 内, 区域 x 可利用蓝水资源量 Q_{blue} , 即为区域自然径流量 Q_{nat} 减去环境基础流量 Q_{EFR} :

$$Q_{\text{blue}}(x, t) = Q_{\text{nat}}(x, t) - Q_{\text{EFR}}(x, t) \quad (5)$$

环境基础流量为维系淡水和河口生态系统及流域内人类生存和福祉所需的水量^[25]。目前环境基础流量的通用计算规则是, 在开发条件下河流每年、每月的平均径流相当于未开发条件下的 $\pm 20\%$ ^[26]。而蓝水足迹可持续性指标 B_{blue} , 等于可利用蓝水资源量与蓝水足迹的比值:

$$B_{\text{blue}}(x, t) = \frac{Q_{\text{blue}}(x, t)}{\sum F_{\text{blue}}(x, t)} \quad (6)$$

1.2 基于灰水足迹的水资源可持续性评价

流域灰水足迹的影响取决于流域可容纳污染物的径流大小, 某流域内一定时间的水质标准得不到满足, 即等同于污染物的量消耗掉水体全部的纳污能力。灰水足迹可持续性又称为水污染程度, 指已消耗的纳污能力占总纳污能力的比例, 等于实际径流与灰水足迹的比值:

$$B_{\text{grey}}(x, t) = \frac{Q_{\text{act}}(x, t)}{\sum F_{\text{grey}}(x, t)} \quad (7)$$

1.3 基于水足迹-粗糙集的流域冲突评估方法

冲突 (conflict), 在社会学上可定义为若干个社会单元在目标上互不相容产生的矛盾。而冲突局势 (conflict situation) 是对冲突问题的描述, 由冲突方、冲突变量及约束条件组成。与冲突方对应的是“偏好” (preference), 指某一冲突方对某个冲突变量值的喜爱程度。对于流域内的社会经济发展, 冲突具体指流域范围内不同地区间的用水和排污冲突。冲突方对应上下游不同的行政单元, 冲突变量包括水资源量 (对应蓝水足迹) 和允许排污量 (对应灰水足迹) 等。采用粗糙集理论, 可以对上下游水足迹可持续性的冲突局势进行评估, 对冲突程度进行量化。粗糙集理论由波兰学者 Pawlak^[27] 于 20 世纪 80 年代提出, 是一种描述不完整性 and 不确定性的数学工具。我国学者安利平等^[28-29] 利用粗糙集理论中的信息系统表示冲突问题, 并提出冲突矩阵的概念, 在此基础上进行冲突描述和分析。

基于粗糙集的离散型冲突量化方法可表示为:

首先定义信息系统为二元组 $S = (N, L)$, 其中 N 为非空有限对象集, L 为非空有限属性集, $\forall a \in L$ 定义函数 $a: N \rightarrow V_a$, 其中 V_a 为 a 的值域。对于流域社会经济发展, N 中元素为所有的冲突局中人, 即为流域上下游不同的行政单元, L 中元素为各争端问题, 包括水资源(蓝水足迹)的分配和允许排污量(灰水足迹)的分配等。 $V_a = \{+1, 0, -1\}$, 即局中人(流域上下游)对分配方案的态度, $+1, 0$ 和 -1 分别表示赞成、中立和反对。由此可建立一个描述流域水系统规划冲突的信息系统, 对规划(分配)方案的冲突进行识别和量化。

将冲突的程度定义为冲突度。规划方案(分配方案) a 对 n 个局中人(流域上下游)的冲突度定义为

$$I_a = \frac{\text{card}(X_a^+) \text{card}(X_a^-)}{\text{int}(n/2)(n - \text{int}(n/2))} \quad (8)$$

其中 $(X_a^+) = \{y \in N: a(y) = +1\}$
 $(X_a^-) = \{y \in N: a(y) = -1\}$

式中: $y \in N$ 代表 y 为 N 中的某一局中人, $a(y) = +1$ 或 $a(y) = -1$ 则表示局中人 y 对分配方案 a 的态度为赞成或反对; $\text{card}(\cdot)$ 为集合的基数; int 为取整函数。

对于属性集 $L (\forall a \in L)$, 其冲突度定义为用来量化整体局势 $S = (N, L)$ 的冲突程度:

$$I_L = \frac{\sum_{a \in A} I_a}{\text{card}(L)} \quad (9)$$

根据其定义, 其值在 $[0, 1]$ 的区间内, 对其冲突程度分级见表 1。

表 1 冲突程度评价分级

序号	冲突程度	冲突分级
1	$[0, 0.2)$	弱冲突
2	$[0.2, 0.4)$	较弱冲突
3	$[0.4, 0.6)$	一般冲突
4	$[0.6, 0.8)$	严重
5	$[0.8, 1]$	非常严重冲突

对于各局中人(流域上下游)之间, 其就某一规划方案的不同偏好, 可以认为是一种距离, 距离越大表示局中人之间的冲突程度越大, 从而表征局中人之间的冲突程度。

对于冲突局势 $S = (N, L)$, 设 $b \subseteq A$, 定义

$$B(y, z) = \left\{ \sum_a d_a(y, z) \mid \text{distance}(a, y, z) \right\}$$

表示局中人 y 和 z 在规划方案集合 b 上的距离总和。对于方案 a, y 与 z 冲突的距离 d 可表示为

$$d = \begin{cases} 0 & a(y) = a(z) \text{ 或 } y = z \\ 1 & a(y)a(z) = 0, a(y) \neq a(z) \\ 2 & a(y)a(z) = -1, y \neq z \end{cases} \quad (10)$$

则局中人 y 与 z 就分配方案集合 b 的冲突程度为

$$\rho_b(x, y) = \frac{\sum_{a \in b} d_a(y, z)}{2|b|} \quad (11)$$

2 案例分析

2.1 研究区简介与数据来源

以青海省湟水河流域的小峡桥断面上游为研究区。湟水河流域位于青海省东北部, 处于青藏高原与黄土高原的过渡地带, 是黄河上游最大的一级支流。研究区地理区位如图 1 所示, 其范围包括西宁市市区(城东区、城北区、城中区和城西区)、大通回族土族自治县、湟源县、湟源县、海晏县和互助土族自治县 6 个区域。本文的用水-排污冲突评估, 也在这 6 个区域间展开。

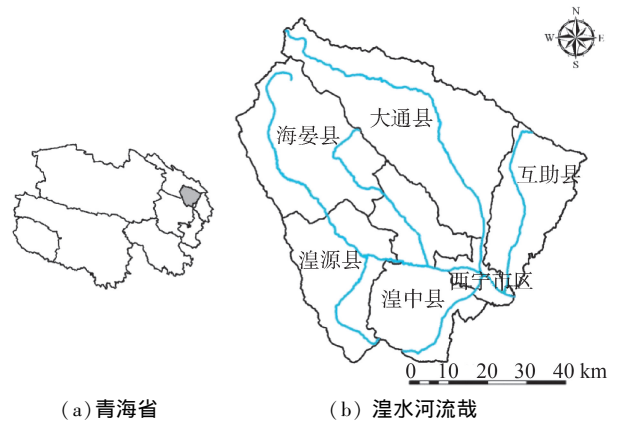


图 1 青海省湟水河流域区位与行政区划

本文涉及的区域水足迹核算, 其周期从 2011—2015 年。各区域的社会经济数据主要来源于《青海省统计年鉴》《西宁市统计年鉴》以及各区县的《国民经济和社会发展统计资料》, 其他参数取值见表 2。

表 2 数据来源

参数类型	参数用途	数据来源
气象数据	核算种植业蓝水足迹	中国气象科学数据共享网
耕种周期、单位面积施肥量	核算种植业蓝水足迹、灰水足迹	《青海省农牧业统计年报》
居民用水强度	核算居民生活蓝水足迹	DB 63/T 1429—2015《青海省用水定额》
养殖耗水、排污强度	核算畜牧业蓝水足迹	徐丽等 ^[30] 研究成果、《第一次全国污染源普查畜禽养殖业排污系数手册》 ^[31]
工业用水、排污强度	核算工业蓝水、灰水足迹	青海省污染普查数据
居民排污强度	核算居民生活灰水足迹	《生活源产排污系数及使用说明》 ^[32] 《农村生活污水处理技术指南(西北地区)》 ^[33]
化肥流失系数	核算种植业灰水足迹	《第一次全国污染源普查——农业污染源:肥料流失系数手册》 ^[34]

2.2 水足迹可持续性核算

根据水足迹可持续性核算方法,得到湟水河流域上下游6个区域2011—2015年的蓝水和灰水足迹可持续性,如图2所示。由图2可以看出,各区域水足迹可持续性均存在较大差异。

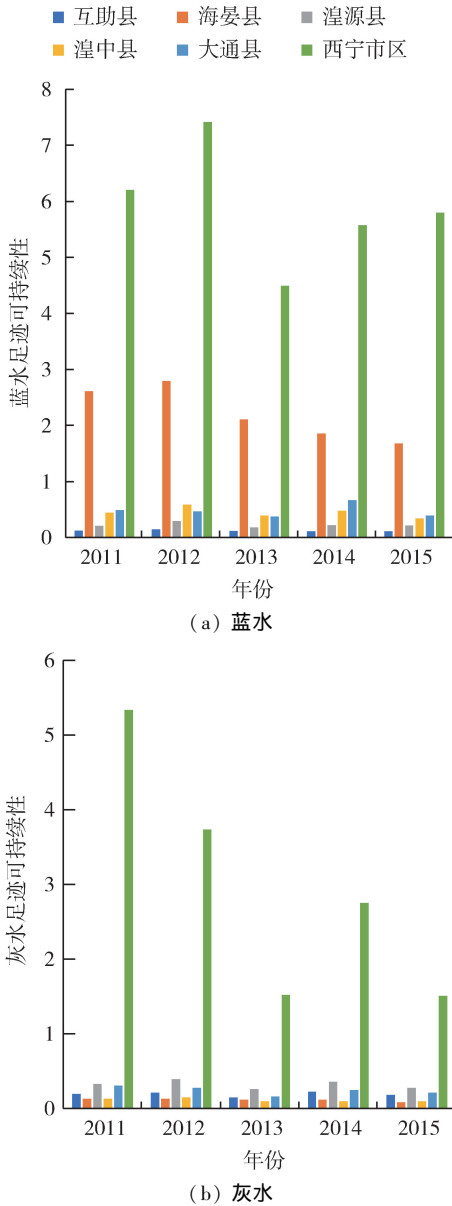


图2 各区域2011—2015年蓝水和灰水足迹可持续性

蓝水足迹方面,下游的西宁市区和上游的海晏县可持续性均高于1,表明这两个区域目前水资源有一定的开发潜力;中游的湟源县和湟中县可持续性在1/3~1/2之间,表明其存在一定的水资源欠缺问题,而大通县和互助县可持续性最低,表明水资源处于严重短缺状态。

灰水足迹方面,大部分区域可持续性均小于1。海晏县等上游区域,由于其较高的水质标准,水环境超载情况较为严重;互助县、大通县、湟中县和湟源县均存在不同程度的超载情况;西宁市区可持续性最强。

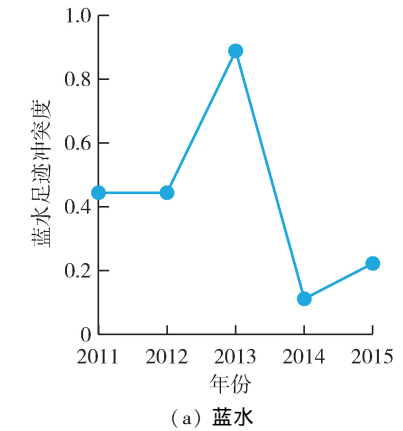
2.3 冲突度与冲突距离核算

根据各区域蓝水和灰水足迹的可持续性,首先评估流域整体的冲突局势。基于可持续发展的目标,进一步细化偏好程度,设 $V_a = \{2, 1, 0, -1, -2, -3\}$,其中每个数值对应的偏好态度如表3所示。

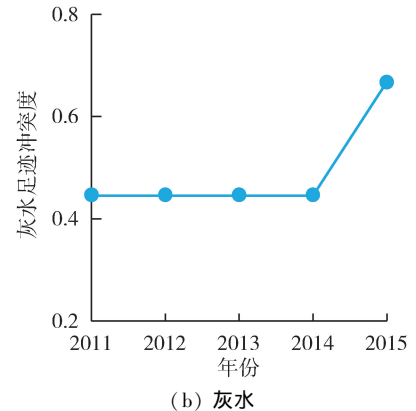
表3 不同水足迹可持续性指数的偏好态度

水足迹可持续性指数范围	偏好态度	偏好取值
$(2, +\infty)$	非常赞成	2
$(1, 2]$	赞成	1
$(2/3, 1]$	中立	0
$(1/3, 2/3]$	不认同	-1
$(1/5, 1/3]$	反对	-2
$(0, 1/5]$	非常反对	-3

根据式(9),对各区域之间的水资源利用和污染物排放冲突度进行核算,得到2011—2015年蓝水足迹和灰水足迹的冲突局势,如图3所示。由图3可以看出,在水资源方面,上下游区域间在2013年出现较为严重的冲突。根据蓝水足迹可持续性评价结果,2013年为干旱年,全流域可利用水资源均大幅降低,因此导致冲突增大。此外,“十二五”末期(2014—2015年)的水资源利用冲突比前期低。在污染物排放方面,2011—2015年时间段整体呈现出较为稳定的冲突局势,冲突程度处于中等水平(均值为0.489)。



(a) 蓝水



(b) 灰水

图3 流域2011—2015年水资源利用与污染物排放的整体冲突局势

在此基础上,根据式(11)核算各区域两两之间的冲突距离,来描述具体区域间的冲突大小,如表4所示。冲突距离表示区域间蓝水足迹和灰水足迹可持续性间的差异,其数值在 $[0,1]$ 之间,表示两区域间对分配方案偏好程度的不同比例,数值越大表示区域间冲突越严重。此外,流域上下游的不同区域,同为冲突中平等的局中人,因此区域 m 与区域 n 的冲突,和区域 n 与区域 m 的冲突是等同的,其内涵即区域 m 与 n 没有就当前分配方案达成共识,因此冲突只有大小,没有方向性。在表4中只有左下三角形区域有数值,右上三角区域与左下呈中心对称关系。

表4 区域间冲突距离

区 域	西宁市区	湟中县	湟源县	大通县	海晏县	互助县
西宁市区						
湟中县	1.0					
湟源县	1.0	0.5				
大通县	1.0	0.9	1.0			
海晏县	0.7	0.5	0.5	1.0		
互助县	1.0	0.5	0.9	0.8	0.9	

由表4可以看出,区域间的差距均在0.5以上,代表上下游间或多或少存在中等或偏大的冲突;位于下游的西宁市区与其余各区域的冲突均较为严重(与其中4个区域的冲突距离为1),是未来流域规划需要解决的重点;湟中县和海晏县与其他区域的冲突相对较小;大通县、湟源县、互助县等区域与其他区域的冲突处于中等水平。

3 结论与展望

3.1 结论

a. 与传统的取水量、排污量等指标相比,水足迹作为流域冲突评估的指标,可以更准确地反映区域社会经济用水和排污需求,并将水质水量联系起来。此外,水足迹核算中对环境基础流量的考虑,也将水生态因素纳入了流域冲突评估范畴。

b. 以青海湟水河流域为例,进行了流域上下游区域间用水和排污冲突的评估。结果显示,在2011—2015年流域水环境整体冲突局势为中等且趋势较为稳定,水资源在干旱年(2013年)冲突较大。位于下游的西宁市区,与上游和中游各区域冲突均较为显著,是未来规划中需要考虑的重点。

3.2 展望

本文将水足迹引入流域冲突评估,主要考虑的是流域水系统的冲突和矛盾,对流域内涉水规划(水资源开发利用规划、水污染防治规划、排水规划等)起指导作用。在“多规融合”的背景下,在未来研究中应加入更多的规划因素,如土地利用、产业布

局等,以此更加全面反映流域内区域的冲突,同时也可更多类型的规划产生指导意义。

参考文献:

- [1] KUCUKMEHMETOGLU M, GEYMEN A. Transboundary water resources allocation under various parametric conditions: the case of the Euphrates & Tigris River Basin[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(11): 3515-3538.
- [2] 吴强,李森,高龙,等. 社会资本参与流域综合治理的现状、问题和建议[J]. *水利经济*, 2019, 37(4): 23-26.
- [3] 华坚,吴祠金,黄德春. 上下游型国际河流水资源分配冲突的博弈分析[J]. *水利经济*, 2013, 31(3): 33-36.
- [4] 胡庆和,施国庆,黄涛珍,等. 非线性 FCA 模型在流域水资源冲突风险评价中的应用[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(2): 6-9.
- [5] 徐大伟,涂少云,常亮,等. 基于演化博弈的流域生态补偿利益冲突分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(2): 8-14.
- [6] 陆海曙. 基于博弈论的流域水资源利用冲突及初始水权分配研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [7] 李胜. 跨行政区流域水污染府际博弈研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [8] 李会民. 冲突分析与合作理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [9] THOMAS L C. Conflict analysis: models and resolutions [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1985, 36(10): 972-973.
- [10] OKADA N, HIPEL K W, OKA Y. Hypergame analysis of the Lake Biwa conflict [J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(7): 917-926.
- [11] 曾勇. 跨界水资源冲突断面控制方法及应用[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.
- [12] KILGOUR D M, HIPEL K W, FANG L. The graph model for conflicts [J]. *Automatica*, 1987, 23(1): 41-55.
- [13] HIPEL K W, KILGOUR D M, FANG L, et al. The decision support system GMCR in environmental conflict management [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 1997, 83(2-3): 117-152.
- [14] 吴育华,程德文. 冲突分析的三维模型[J]. *系统工程理论与实践*, 1995, 15(8): 30-36.
- [15] 王慧敏,于荣,牛文娟. 基于强互惠理论的漳河流域跨界水资源冲突水量协调方案设计[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(8): 2170-2178.
- [16] 于荣,王慧敏,牛文娟,等. 漳河流域水资源冲突政策影响机制模拟[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(4): 1067-1075.
- [17] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. *Water Resources Management*,

[18] 刘静,余钟波. 基于水足迹理论的中国水资源压力评价[J]. 水资源保护,2019,35(5):35-39.

[19] 尚海洋,宋妮妮. 碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J]. 水资源保护,2018,34(2):15-21.

[20] 黄凯,王梓元,杨顺顺,等. 水足迹的理论、核算方法及其应用进展[J]. 水利水电科技进展,2013,33(4):78-83.

[21] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等. 辽宁省水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 水利经济,2016,34(3):46-52.

[22] 任晓晶,白雪,刘丹,等. 水足迹评价方法对比及案例研究[J]. 水利经济,2018,36(6):18-23.

[23] 马骏,王薇薇. 基于水足迹的大樟溪流域生态补偿研究[J]. 水利经济,2015,33(3):28-31.

[24] 梅婷,秦丽杰. 吉林市城乡居民膳食消费的水足迹研究[J]. 水利经济,2013,31(1):14-18.

[25] POFFN L, BRIAN D R, ANGELA H A, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards [J]. Freshwater Biology, 2010, 55 (1): 147-170.

[26] ANGELA H A, STUART E B, POFFN L, et al. The

challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems [J]. Ecological Applications, 2006, 16 (4):1311-1318.

[27] PAWLAK Z. Rough sets [J]. International Journal of Parallel Programming, 1982, 11 (5): 341-356.

[28] 安利平,陈增强. 基于粗糙集的多准则决策分析[J]. 控制与决策,2013(1):1-12.

[29] 安利平,全凌云. 基于粗糙集理论的约简、决策规则与模式[J]. 计算机工程与设计,2008,29(7):1773-1776.

[30] 徐丽丽,刘先国,刘丹青,等. 基于水足迹的生态畜禽养殖基地生产用水分析[J]. 安全与环境工程,2014,21(6):18-22.

[31] 第一次全国污染源普查-畜禽养殖业源产排污系数手册[R]. 北京:中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所;南京:环境保护部南京环境科学研究所,2009.

[32] 生活源产排污系数及使用说明(修订版2011)[R]. 广州:环境保护部华南环境研究所,2010.

[33] 农村生活污水处理技术指南(西北地区)[R]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2010.

[34] 第一次全国污染源普查:农业污染源:肥料流失系数手册[R]. 北京:第一次全国污染源普查领导小组,2009.

(收稿日期:2019-12-06 编辑:胡新宇)

· 简讯 ·

河海大学举行非洲水资源保护和粮食安全高端论坛暨法语区域与国别研究学术研讨会

2020年10月25日,非洲水资源保护和粮食安全高端论坛暨法语区域与国别研究学术研讨会在河海大学举行。河海大学副校长徐卫亚,中国法语教学研究会副会长、中国非洲问题研究会常务副会长、南京大学刘成富教授,武汉大学及非洲研究中心相关负责同志等出席开幕会。会上,徐卫亚副校长和刘成富教授共同为“河海大学法国与非洲法语区国家研究中心”揭牌。

开幕会上,徐卫亚副校长代表学校致欢迎词,并向与会专家、学者的到来表示热烈欢迎。他指出,河海大学自20世纪60年代起与非洲地区国家在人才培养、科学研究和社会服务方面开展了广泛合作。近年来,在“中非命运共同体”理念指引下,学校积极与海外高等院校、科研院所共建国际合作研究中心,深入开展学术交流与科技合作。2020年教育部批准成立的河海里尔学院更是河海大学面向法语区国家人才培养体系创新的重要实践。未来,河海大学将一如既往地利用学科优势主动对接国家战略需求,服务不断发展的中非合作关系。

刘成富教授在发言中指出,非洲经济增长进程中日益增长的用水需求与水资源缺乏之间的矛盾将成为非洲目前和未来数十年面临的巨大挑战。非洲多国自2019年以来,特别是疫情之后,粮食安全形势出现恶化趋势。中国也正和非洲多国开展更紧密合作,帮助非洲国家开展水资源利用与保护,提高应对粮食危机的能力。他希望借助区域与国别研究中心的成立,河海大学将教学、科研、人才培养与国家发展战略结合起来,为中非合作、中非命运共同体贡献才智。

研讨会上,前中国驻卢旺达、摩洛哥大使孙树忠教授,中国非洲史学会会长、北京大学非洲研究中心李安山教授分别做主旨发言,与会专家学者分别以“非洲水资源利用、保护,非洲水域合作与竞争”“非洲粮食安全与对非国际发展合作”和“法语区域与国别研究”为主题依次进行大会发言。

河海大学法国与非洲法语区国家研究中心将发挥智库功能,开展有语言文化特色的非洲研究,形成卓有成效、具有一定社会影响力的研究成果,为河海大学国际化发展和“双一流”建设贡献力量。

研讨会由河海大学、中国非洲问题研究会主办,河海大学社科处、外国语学院、长江保护与绿色发展研究院和江苏长江保护与高质量发展研究基地承办,来自中国社科院、新华社、北京大学等智库与兄弟院校的代表以及河海大学社科处、国际合作处负责人、河海大学外国语学院的师生代表通过线上、线下同步参加了会议。

(本刊编辑部供稿)