

长江经济带水足迹字典序优化配置研究

——基于“人口-城乡-就业”视角

刘 钢^{1,2,3},王雪艳²,方 舟²,赵 爽⁴

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098;
2. 河海大学管理科学研究所,江苏南京 210098;3. 河海大学沿海开发与保护协同创新中心,江苏南京 210098;
4. 浙江广播电视大学教学中心,浙江杭州 310030)

摘 要:针对长江经济带日益突出的人水矛盾,基于水足迹理论,构建基于人口数量的流域水足迹字典序优化配置模型,并提出水资源承载力的平衡指数模型,综合辨识人口结构对长江经济带水足迹字典序优化配置的作用机制。研究表明:人口总量对水足迹字典序优化配置具有显著的正向影响,人类活动强度是影响区域水资源承载力的平衡指数的关键要素;基于人口数量的流域水足迹字典序优化配置方案具有显著的城乡二元结构特征,本质上反映了城乡基础设施及产业结构的空间差异状态。该配置方案还具有人口就业结构特征,本质上反映了产业用水效率的空间差异状态。
关键词:水足迹;字典序优化算法;人口结构;长江经济带
中图分类号:X24 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4970(2019)01-0061-10

一、引 言

水是生态之基、生产之要、生命之源。2017 年,联合国教科文组织指出,全球约有 5 亿人口的水资源消耗量超过了所在区域的可再生水资源量,水资源短缺已成为全球性的发展问题^[1]。2013 年,中国

人均水资源量仅为 2 059.70 m³,约为世界人均水资源量的 1/4,是世界上 13 个最缺水的国家之一。长江经济带横贯中国的东、中、西部,是衔接“一带一路”倡议和双向开放战略的重要纽带,涉及 40% 多的全国人口,GDP 总量接近 26 万亿元。但是,长江经济带沿线省份的发展情况差异性显著,由水而生

收稿日期:2018-10-16
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404600);中央高校基本科研业务费(2018B41914);浙江省自然科学基金项目(LQ14G030020)
作者简介:刘钢(1981—),男,山西太原人,副教授,从事生态系统服务与公共资源治理研究。

的混合冲突是落实《长江经济带发展规划纲要》的核心瓶颈。习近平总书记提出的“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水方针指出,面对水资源的严峻形势,必须树立人口经济与资源环境相适应的原则,以新思路治水促进经济社会可持续发展。因此,有机整合水资源供需双侧矛盾、精准开展水资源配置对长江经济带的可持续发展具有重大意义。

水足迹是指任何已知人口(一个国家、一个地区、一个人)在一定时间内消耗所有产品和服务所需要的水资源数量^[2]。作为反映人类生产生活全链条需求水结构的关键指标,水足迹可以通过优化用水需求结构来调整水资源供给结构,这成为了水资源配置研究的新思路。英国学者 Allan 于 1993 年首次提出了虚拟水的概念^[3]。其后,基于“生态足迹”理论^[4],荷兰水资源专家 Hoekstra 提出了“水足迹”的概念^[5],进一步丰富了虚拟水理论。自 2002 年以来,Chapagain 等对工农业产品的水足迹^[6]和全球不同国家的水足迹^[7]进行核算。在我国,龙爱华等首次引进水足迹概念,并对西北 4 省区的水足迹进行了测算^[8]。除此以外,我国学者对水足迹的研究主要包括基于水足迹理论的区域用水结构差异。孙才志等通过分析我国 31 省市的水足迹强度来衡量区域水资源利用效率^[9];田贵良等基于地区贸易水足迹差异提出用水结构优化的政策建议^[10]。基于水足迹理论的水资源评价^[11]和管理策略^[12]也是研究的热点。现有研究已构建了较为完善的水足迹体系。

针对长江经济带由水而生的混合冲突,传统水资源配置无法解决水资源供需失衡的公平、效率配置问题,如何在满足公平性原则基础上对水资源进行优化配置是研究的难点。Yager 指出,定序均衡权重(OWA)复合函数^[13]符合三大公平性原则^[14],而在有限主体配置的多目标决策中,OWA 复合函数被认为是关于定序产出值的字典序排列^[15],字典序最小化最大值算法就是在保障公平性基础上寻求帕累托优化的技术^[16]。字典序算法多被用于解决多阶段资源分配^[17]和线性多目标问题^[18]。Klein 等指出,利用字典序算法对多阶段资源进行分配具有速度快的优势^[16];Luss 等用字典序算法解决可存储资源的多阶段分配问题^[17];Pasandideh^[19]和

Niknamfa^[20]通过字典序 max-min 法为多利益相关者设计了一个公平的利润合同,该方法还可拓展到解决各种离散优化问题^[21]。对于字典序 max-min 问题的求解算法,Luss 等提出了基于 minimax 算法的工业生产原料配置循环算法^[22];Wang 在河流水权配置领域改进了 Luss 的算法^[23]。字典序 max-min 法具有较广的应用范围,对于解决水资源公平配置问题具有独到的优势。此外,多国学者的研究表明,人口数量是资源公平、有效配置的关键指标,如 Mimi 等在对约旦河水资源在所流经的 5 个国家进行分配时指出,水资源的公平分配包括人口因素^[24]。

综上所述,水足迹能系统辨识水资源供需关系,是近年来国际主流分析水资源供需结构的主要方法。字典序 max-min 法能够针对典型特征因子实现保障公平原则基础上的效率与可持续目标,因此,在精准测算长江经济带水足迹基础上,以人口数量作为关键影响因子,运用字典序 max-min 法配置长江经济带水足迹,系统分析水足迹供需结构差异,精准刻画跨尺度的水资源需求情况,逆向优化水资源供给结构,这对于保障长江经济带健康可持续发展、解决人水冲突具有重要意义。

二、问题概化及求解算法

作为准公共物品,水资源具有显著的外部性、流动性和稀缺性等特征。为了实现水资源的优化配置、提升区域承载能力,引入字典序 max-min 算法,以各省市人口总量作为定序指标,构建流域水足迹字典序优化配置模型,并给出求解算法。

1. 基本假设

假设 1:理论研究中水足迹一般由蓝水足迹、绿水足迹及灰水足迹构成,但在全球的水资源管理实践中,尚无权威机构发布灰水足迹相关数据。同时,Pute^[25]、Hoekstra^[26]以及 Kang^[27]等学者的经典研究中也暂未考虑灰水足迹。因此,针对长江经济带测算水足迹,笔者主要考虑蓝水足迹与绿水足迹,不考虑灰水足迹。

假设 2:长江经济带各省份的总水足迹由三次产业水足迹以及生活生态水足迹构成,而且生活生态水足迹不受各产业水足迹优化影响,不参与水足迹字典序优化。

假设3:各地区的人口增幅稳定,第*i*区域人口增长率为 β_i 保持不变,即 $\beta_i = c \pm \varepsilon$, $c \neq 0$ 且为常数, ε 是无穷小项且为常数。

2. 水足迹字典序优化配置模型构建

水足迹原始值(WF_i)由一产水足迹原始值(WF_{1i})、二产水足迹原始值(WF_{2i})、三产水足迹原始值(WF_{3i})和生活生态水足迹(WF_{ci})组成。对于一产水足迹原始值(WF_{1i}),采用CROPWAT模型与生产树法^[7]从农业和畜牧业两方面进行核算;参考孙才志等^[9]学者的研究思路,从生产者角度测算区域二产水足迹原始值(WF_{2i});对于三产水足迹原始值(WF_{3i}),考虑到三产水足迹数据获取问题,借鉴孙才志等^[28]的思路,用三产用水量代替三产水足迹,参考《中国统计年鉴(2014)》中关于“生活用水”的定义可知,三产用水量=生活用水量-居民用水量

$$Lex \min_{x_{wi}} [f^w(x_{wi})] = Lex \min_{x_{wi}} [\alpha_{wi} \frac{(WF_{wi} - x_{wi})}{WF_{wi}}], w \in (1, 2, 3), i = 1, 2, \dots, n$$

$$\left\{ \begin{array}{l} WF_{1i} = \sum_j \frac{10K_{ij} \sum_d ET_{ij}(d) S_{ij}}{G_{ij}} + \sum_k M_{ik} \\ \frac{\int_{birth}^{slaughter} \{WATER_{ikd} + WATER_{ik,serve} + WATER_{ikh} + \sum_h SWD(h) \times C_{ik}(h)\} dt}{WEIGHT_{ik}} \\ WF_{2i} = Q_{iM} P_{iIO} + VW_{iI} - VW_{iO} \\ s.t. \quad WF_{3i} = WC_{ti} = \sum_g U_{ig} PQ_i - WC_{ri} \\ WF_{ci} = WC_{di} + A_i \eta_i EP_i \\ \alpha_{wi} = \left\{ \frac{PQ_{wi}}{\sum_i PQ_{wi}} \mid 0 < \alpha_{wi} < 1 \right\}, w \in (1, 2, 3) \\ 0 \leq \sum_{w \in (1, 2, 3)} \sum_{i \in N} (x_{wi} + WF_{ci}) \leq \sum_{i \in N} Q_i \\ \underline{Q}_i \leq x_{wi} + WF_{ci} \leq \bar{Q}_i, \forall i \in N \end{array} \right. \quad (1)$$

式中:*i, j, k* 分别是省份*i*, 作物*j*, 动物*k*。对于作物, K_{ij} 是*i*省种植作物*j*生育阶段平均作物系数,由于缺少区域层面的相关数据,使用FAO推荐值。 ET_{ij} (mm/d)是参考种植作物的*i*省作物*j*每天的蒸发蒸腾量, G_{ij} (t/km²)是*i*省作物*j*的单位面积的产量, S_{ij} (t/a)是*i*省作物*j*的年产量。对于动物, M_{ik} (t/a)

-建筑业用水,根据第一次全国水利普查可知,建筑业企业用水量计量尚未普及,建筑业用水采取典型调查方式^[29],数据不具有代表性,因此未考虑;以居民用水量和绿地用水之和作为生活生态水足迹。

假设有*n*个主体参与长江经济带水足迹配置,*i*省水足迹优化值为 x_{wi} , $w \in (1, 2, 3)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。其中,1,2,3 分别代表一、二、三产业。 $f^w(x_{wi}) = \alpha_{wi} (WF_{wi} - x_{wi}) / WF_{wi}$, $w \in (1, 2, 3)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 表示*i*省第一、二、三产业的水足迹供需匹配度,若供需匹配度<0,表明*i*省*w*产业存在剩余水足迹;若供需匹配度>0,表明*i*省*w*产业存在短缺水足迹;若供需匹配度=0,表明*i*省*w*产业水足迹供需平衡。进一步结合公平配置原则,以人口数量是关键影响因子,针对有限配置主体参与下的区域水足迹配置问题,构建水足迹字典序配置模型如下:

是*i*省动物*k*的年产量, $WATER_{ikd}$ (m³/d)表示*i*省动物*k*每日饮用水量, $WATER_{ik,serve}$ (m³/d)表示*i*省动物*k*饲养平均须用水量,即动物生命期内清理动物活动范围、维持环境和其他相关服务所消耗的水资源量;动物*k*生命周期中通过食用饲料作物*h*消耗的水量由两部分组成, $WATER_{ikh}$ (m³/d)是准备饲料耗用的水量, $SWD(h)$ (m³/t)表示饲料作物*h*的需水量, $C_{ik}(h)$ (t/d)表示*i*省动物*k*消耗的饲料作物*h*的数量, $WEIGHT_{ik}$ (t)表示*i*省动物*k*屠宰时的平均重量。 Q_{iM} (m³/a)为*i*省万元工业产值耗水量, P_{iIO} (元/a)为*i*省年工业总产值, VW_{iI} (m³/a)为*i*省进口贸易的虚拟水含量, VW_{iO} (m³/a)为*i*省出口贸易的虚拟水含量, WC_{ti} (m³/a)是*i*省三产用水量, U_{ig} (m³/人)是*i*省人均用水定额, PQ_i (人)为*i*省的人口数量, WC_{ri} (m³/a)是*i*省居民用水量。 A_i (km²)为*i*省城镇面积, η_i 是不包含水面的城市绿化覆盖率, EP_i (m³/km²)为*i*省单位面积植物蒸腾蒸散量。 PQ_{wi} (人)为*i*省*w*产业的人口数量, Q_i (m³)是*i*省可利用水资源总量, $\underline{Q}_i$ 、 $\bar{Q}_i$ 分别是*i*省可利用水资源总量的下限和上限。目标函数是按字典序以迭代的方式调整水足迹供需匹配度。约束五表征*i*省*w*产业人口在长江经济带11省市*w*产业总人口中的占

比。约束六表征 11 省市总水足迹优化总值必须满足长江经济带可利用水资源总量约束。约束七表示 i 省总水足迹优化值的取值范围。

假设 $\sum_{i \in N} \underline{Q}_i \leq \sum_{i \in N} Q_i, i \in N$, 以保证最优解的存在。此外, 由于可利用水资源总量无法充分满足所有省份的用水需求, 即至少存在一省总水足迹原始值存在短缺, 有 $\exists \left\{ i \mid \sum WF_{wi} + WF_{ci} \geq Q_i, i \in N, w \in (1, 2, 3) \right\}$, 则必然存在 $Lexmin^* > 0$ 。

3. 求解算法

求解公式(1)的核心在于以字典序方式重复求解每一轮中的最小化最大值问题, 即:

$$\begin{cases} P^* = \min \left[\max_{i \in I} \left(\alpha_{wi} \frac{WF_{wi} - x_{wi}}{WF_{wi}} \right) \right], w \in (1, 2, 3) \\ \text{s. t. } \sum_{i \in I} \alpha_{wi} \frac{WF_{wi} - x_{wi}}{WF_{wi}} \leq Q_i, \forall i \in I \\ L_{wi} \leq x_{wi} \leq U_{wi}, \forall i \in I \end{cases} \quad (2)$$

本研究算法主要参考 Luss^[22] 和 Liu 等^[30] 的求解思路, 原文算法主要针对多种产品生产中的多种生产原料多期配置问题。本文研究长江经济带可利用水资源总量约束下区域水足迹公平配置问题, 可以表征为多利益相关者参与下的单资源单期配置问题, 与 Luss 算法在问题定位上具有相对一致性, 即都属于多主体资源配置问题。由于水足迹具有共有资源的特殊性, 而其字典序 max-min 问题的求解算法相对于传统算法又具有一定差异性。这种差异性主要体现在: ①假设条件差异性。由于水资源投入与包括资本、人力等生产资源投入具有不同特点, 因此, 传统工业生产中字典序 max-min 问题的假设中多使用累积变量与参数设计, 本文假设使用分段连续变量与参数设计。②目标函数差异性。原文目标函数中求解变量为产能水平, 在约束中通过单位产品资源耗损率与资源总量限制相关联, 本文目标函数中求解变量为以人口数量作为影响因子对水足迹进行优化的优化值, 适合于考虑“公平、效率”准则的多目标多主体水资源跨区域配置工作。

因此, 从水足迹视角出发, 以人口数量为影响因子, 在改进 Luss 提出的传统多期字典序配置算法的基础上, 提出面向水足迹优化配置问题的字典序配置算法。求解过程如下:

步骤 0: 初始化条件, $\tilde{L}_{wi} = L_{wi}$ 和 $\tilde{U}_{wi} = U_{wi}$, 有 $i \in I, w \in (1, 2, 3)$

步骤 1: 计算 $S_i = \sum_{w \in (1, 2, 3)} WF_{wi} - Q_i, \forall i \in I, R_w = \sum_{w \in (1, 2, 3)} WF_w / \alpha_w$

对于 i 省份的可利用水资源总量 Q_i , 拒绝所有使 $S_i \leq 0$ 的省份。如果所有 $Q_i = 0$, 则令 $x_{wi} = WF_{wi}, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3), k_w = 0$, 转到步骤 8。

步骤 2: 计算,

$T_w = \sum_i WF_{wi} - a_w, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3), a_w$ 为 i 省 w 产业水足迹优化值的试错值。

$$M_{wi} = \frac{PQ_{wi}}{\sum PQ_{wi}} \sum WF_{wi}, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$$

$$avg_w = \frac{a_w}{\sum_i PQ_{wi}}, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$$

$$M_{wi}^* = avg_w \times PQ_{wi}, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$$

$k_w = T_w / R_w$ 。对于 $R_w > 0$, 则令 $k = \max \{k_w\}, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$ 。

步骤 3: 若 $\min(WF_{wi}, M_{wi}) \leq M_{wi}^*, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$, 转到步骤 4, 否则转到步骤 6。

步骤 4: 若 $WF_{wi}(1 - k/\alpha_{wi}) \leq \min(WF_{wi}, M_{wi}), \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$, 转到步骤 5, 否则令 $x_{wi} = \min(WF_{wi}, M_{wi}), \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$

步骤 5: 若 $WF_{wi}(1 - k/\alpha_{wi}) \leq 0, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$, 令 $x_{wi} = \min(x_{wi}, M_{wi}), \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$, 否则令 $x_{wi} = WF_{wi}(1 - k/\alpha_{wi}), \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$

步骤 6: 若 $WF_{wi}(1 - k/\alpha_{wi}) \leq \min(WF_{wi}, M_{wi}), \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$, 转到步骤 7, 否则令 $x_{wi} = \min(WF_{wi}, M_{wi}), \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$

步骤 7: 若 $WF_{wi}(1 - k/\alpha_{wi}) \leq M_{wi}^*, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$, 令 $x_{wi} = M_{wi}^*, \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$, 否则令 $x_{wi} = WF_{wi}(1 - k/\alpha_{wi}), \forall i \in I, w \in (1, 2, 3)$

步骤 8: 对于每轮计算中的 max-min 问题, 有如下计算结果,

$$x_{wi} = WF_{wi}, i \in I, w \in (1, 2, 3), \forall Q_i = 0$$

$$P_w^* = \max \left[k, \max_{i \in I} (\alpha_{wi} f(x_{wi})) \right], i \in I, w \in (1, 2, 3)$$

步骤 9: 根据上轮最小化最大值结果调整 Q_i , 并将其中满足 $i \in \{i: |R_{wi}| = 0\}$ 的省份 i 去除。

步骤 10: 升级约束条件的下限 $\tilde{L}_{wi}$ 和上限 $\tilde{U}_{wi}$, 去除满足 $i \in \{i: |\tilde{L}_{wi} = \tilde{U}_{wi}\}$ 的省份 i , 升级 Q_i 。同时, 去除满足 $i \in \{i: |\sum_{w \in (1,2,3)} \tilde{L}_{wi} = Q_i\}$ 的省份 i 。若所有变量 i 均被去除, 则停止。否则, 定义新的 P_w^* 问题包含剩余 i , 重新回到步骤 0。

通过字典序算法可以保障定额模型严格符合公平原则^[23], 同时, 由于权重系数的存在, 能够实现可利用水资源总量约束下区域水足迹优化的公平相容^[31]约束, 对提升区域水足迹配置的公平与效率具有重要价值。

4. 水资源承载力的平衡指数

水资源承载力的平衡指数 (Index of Water Supply and Demand, IWSD) 是指一个国家或地区可利用水资源总量满足区域用水需求总量的程度^[32], 可用于衡量一定尺度下水资源量对社会经济系统的支撑能力。具体计算公式如下:

$$IWSD_i = \frac{Q_i - WF_i}{Q_i} \tag{3}$$

式中: Q_i 为第 i 省 (市) 的可利用水资源总量, 是通过工程措施可为经济社会发展提供的最大水量^[33], 反映水资源供给能力; WF_i 为第 i 省 (市) 的水足迹总量, 是生产、生活及生态所需要的水资源总量, 反映区域用水需求。 $IWSD_i$ 越高, 表明用水需求满足程度越高, 区域水资源承载力越强。当 $IWSD_i \geq 0$ 时, 表明当前可利用水资源总量满足区域用水需求, 水资源承载力得到保障; 当 $IWSD_i < 0$ 时, 表明当前发展用水需求突破水资源禀赋, 水资源供需矛盾制约当地社会经济发展。

三、案例分析

1. 数据来源

选取长江经济带 11 个省市作为研究区域, 并按照空间距离关系将其划分为上、中、下游 3 个区域, 上游包括四川、贵州、云南、重庆, 中游包括湖北、湖南、江西, 下游包括安徽、江苏、浙江和上海。研究数据主要来自《中国统计年鉴 (2014)》、各省《统计年鉴 (2014)》、各省《2013 年国民经济和社会发展统计公报》《中国水资源公报 (2013)》及《长江流域及西南诸河水资源公报 (2013)》。气象数据主要来自

于中国气象科学院网站 (<http://www.camsma.cn>), 农作物系数数据来自于 FAO 的世界各国气象数据库 (<http://www.fao.org>)。种植作物主要考虑稻谷、中稻、小麦、玉米、高粱、豆类、薯类、花生、油菜籽、烟叶、蔬菜、瓜果等品种, 畜牧产品主要考虑牛肉、羊肉、猪肉、牛奶、禽蛋、禽肉等。

2. 结果分析

(1) 长江经济带水足迹配置方案

为了缓解长江经济带的用水压力、提高用水效率, 选取人口数量作为长江经济带水足迹公平配置关键影响因子。采用字典序 max-min 法开展水足迹优化配置研究, 计算得出长江经济带第一、二、三产业水足迹的最优解分别为 5 444. 33 亿 m^3 、504. 70 亿 m^3 和 243. 75 亿 m^3 。长江经济带各省市三次产业水足迹值、水资源承载力的平衡指数和供水量如表 1~2 所示。

表 1 长江经济带三次产业水足迹 亿 m^3

省市	一产水足迹	二产水足迹	三产水足迹	一产水足迹	二产水足迹	三产水足迹
	原始值	原始值	原始值	优化值	优化值	优化值
重庆	226. 65	41. 60	14. 04	147. 48	21. 84	12. 52
四川	1 060. 50	45. 74	33. 05	950. 47	35. 55	30. 95
云南	769. 21	29. 30	16. 32	710. 90	18. 58	14. 23
贵州	243. 58	29. 13	14. 08	201. 69	12. 77	9. 05
湖北	915. 52	94. 14	30. 08	798. 09	57. 06	27. 41
湖南	651. 07	86. 57	33. 22	571. 29	61. 50	30. 49
江西	610. 33	64. 30	23. 14	459. 47	42. 50	20. 28
安徽	868. 66	78. 75	24. 77	748. 73	59. 93	23. 00
江苏	1 312. 44	207. 99	36. 81	560. 01	146. 79	34. 37
浙江	459. 83	31. 36	32. 90	275. 78	26. 63	29. 03
上海	123. 00	42. 24	14. 16	20. 40	21. 55	12. 42

表 2 长江经济带水足迹、供水量和
水资源承载力的平衡指数

省市	水足迹 原始值 /亿 m^3	水足迹 优化值 /亿 m^3	水资源承 载力的平 衡指数/%	水资源承 载力的平 衡指数 (优化)/%	供水量 原始值 /亿 m^3	供水量 优化值 /亿 m^3
重庆	288. 25	187. 81	39. 23	60. 40	83. 90	54. 67
四川	1 152. 94	1 030. 63	53. 33	58. 28	242. 50	216. 77
云南	820. 01	748. 89	51. 95	56. 12	149. 70	136. 72
贵州	290. 01	226. 72	61. 81	70. 14	92. 00	71. 92
湖北	1 050. 96	893. 79	-33. 02	-13. 12	291. 80	248. 16
湖南	782. 14	674. 55	50. 56	57. 36	332. 50	286. 76
江西	704. 13	528. 61	50. 55	62. 88	264. 80	198. 79
安徽	982. 51	842. 00	-67. 78	-43. 78	296. 00	253. 67
江苏	1 575. 93	759. 86	-455. 88	-168. 03	576. 70	278. 07
浙江	540. 19	347. 55	42. 00	62. 68	198. 30	127. 58
上海	190. 44	65. 41	-580. 14	-133. 60	123. 20	42. 31

通过水足迹字典序优化配置,长江经济带各省份水足迹变化显著(图1)。

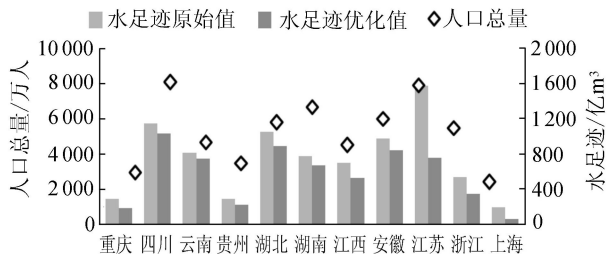


图1 长江经济带各省份水足迹配置

由图1可知,长江经济带11个省市水足迹优化值均呈降低趋势,但降幅的空间差异性显著。长江经济带整体降幅为24.73%,其中,下游地区整体降幅最大,达到38.74%;上游地区最小,为14%。对比分析各省市人口规模与水足迹可以发现,长江经济带11个省市人口总量与水足迹优化值存在显著正相关关系,相关系数为0.846,表明人口是影响水足迹的关键要素;长江经济带11个省市的水足迹优化值均与其人口总量高度匹配,人口数量越大,水足迹优化值越高,表明当地的生产生活用水需求越旺盛。

(2) 长江经济带水资源供水配置方案

在优化需水结构的基础上进一步从以需定供、精准定需的视角,根据人口数量的水足迹字典序配置算法实现供水量的公平配置(图2)。

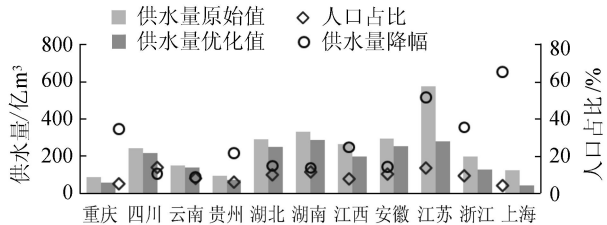


图2 长江经济带各省份供水配置

由图2可知,长江经济带各省市供水量降幅显著,整体降幅为27.76%,上、中、下游的整体降幅分别为15.49%、17.48%和41.25%。长江经济带上、中、下游区域供水量原始值的比值约为21:34:45,而优化后的比值约为25:38:37。综合考虑各省市供水量与人口规模可以发现,各省市供水量原始值与优化值均和该省市人口总量占长江经济带人口总量比重呈正相关关系,相关系数分别为0.786、0.861,可见,依人口数量的水足迹字典序优化算法能够在不改变各区域供水格局的基础上提升各省市

供水与人口的匹配性。另外,运用算法进行优化前后对比发现,长江经济带各省市人均供水量的标准差由146.58降低为105.75,因此,本算法能够有效降低各省市人均供水量差异性。

人口总量不仅是影响水资源需求的关键要素,同时也是供水量配置的关键所在。优化后人均水足迹排序为中游(1232.6 m^3)>上游(1138.8 m^3)>下游(920.7 m^3),人均供水量排序为中游(431.30 m^3)>下游(320.64 m^3)>上游(249.19 m^3),长江经济带各区域水资源供需不均衡现象仍然突出。

(3) 长江经济带水资源承载力的平衡指数优化前后响应关系

为厘清长江经济带水资源供需的不平衡状态,计算长江经济带各省市水资源承载力的平衡指数,旨在有效度量水资源供给与人类需水之间的冲突状态,为解决长江经济带水资源供需矛盾提供理论依据。

由图3可以看出,通过水足迹字典序优化配置,长江经济带整体水资源承载力的平衡指数由24.08%提升为42.86%,上、中、下游地区水资源承载力的平衡指数分别由52.85%、33.16%和-79.89%提升为59.45%、44.76%和-10.20%。区域水资源承载能力得到显著提升,其中,下游地区优化后水资源承载力的平衡指数大幅提升,但始终为负值,存在超采超用现象,属于水资源严重超载地区,严重制约当地可持续发展。

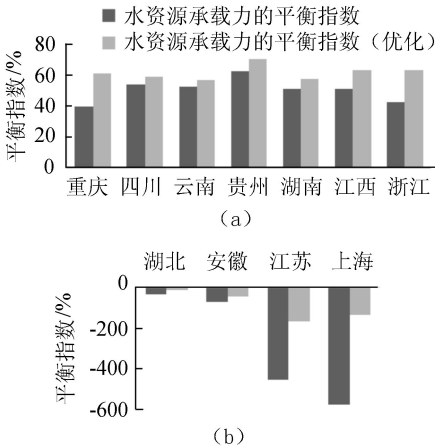


图3 长江经济带各省份水资源承载力的平衡指数

优化前后,湖北、安徽、江苏和上海4个省市水资源承载力的平衡指数始终为负值,主要集中在下游区域。究其原因,一方面是由于区域可利用水资

源总量存在差异,上、中、下游可利用水资源总量比为 49 : 34 : 17,下游地区水资源禀赋较差;另一方面由长江经济带人口分布格局可知,以人均 GDP 表征的人类活动强度与水资源承载力的平衡指数之间呈负相关关系,相关系数为-0.721。其中,长江经济带下游区域年人均 GDP 为 12 万元,作为长江经济带人类活动强度密集地区,水资源供需矛盾最为突出,优化后水资源承载力的平衡指数从-79.89% 提升为-10.20%;上游区域的人类活动强度最弱,年人均 GDP 为 3 万元,优化后水资源承载力的平衡指数从 52.85% 提升为 59.45%。需要指出的是,上海、江苏的人均可利用水资源量仅为 115.93m³/a 和 357.08m³/a,按照 Falkenmark 的水紧缺标准^[34]可知,上海和江苏均为极度缺水地区。同时,作为中国经济最发达的长三角城市群地区,上海和江苏的水资源承载力的平衡指数最差,仅为-580.14%和-455.88%,这充分说明,水资源承载力的平衡指数应当作为城市群建设的先决条件,城市群建设发展必须坚持以水定城的战略方针。

综合来看,水资源承载力的平衡指数较差区域主要集中在长江下游地区,这与当地较差的水资源禀赋与过高的人类活动强度有密切的关系。与此同时,长江经济带不同区域的水资源供需不平衡状态与各区域人口城乡结构、产业结构有着密切关系。因此,进一步分析城乡二元结构和三次产业的人口就业结构对水足迹字典序配置的作用机制。

四、长江经济带人口结构对水足迹公平配置的影响分析

1. 人口城乡二元结构对水足迹公平配置的影响分析

人口的城乡结构是影响水足迹公平配置的生活特征要素。通过分析城镇人口和乡村人口分别与水足迹优化值的关系,研究城乡二元结构对水足迹字典序优化配置的影响(图 4)。

由图 4 可知,长江经济带城镇人口为 3.08 亿,长江经济带乡村人口为 2.74 亿,上、中、下游人口城镇化率分别为 44.61%、50.43%和 62.24%。对比长江经济带 2013 年水足迹指标(上游>中游>下游)可知,长江经济带区域城镇人口与水足迹具有逆向

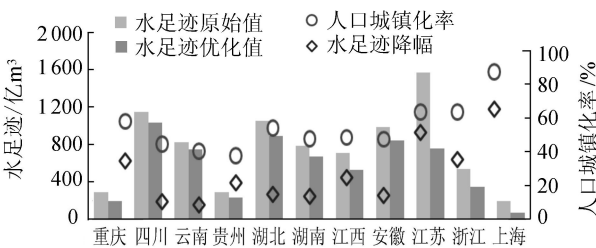


图 4 长江经济带城乡二元结构对水足迹的影响

分布的特点。同时,水足迹降幅与人口城镇化率同方向变动,由此可知,人口城乡二元结构对水足迹优化配置具有显著影响。

对长江经济带 11 个省市的人口城乡分布与水足迹优化值进行 Spearman 相关性分析。结果表明,长江经济带城镇人口和乡村人口均与水足迹优化值呈正相关关系,相关系数分别为 0.609 和 0.845。其中,城镇人口和乡村人口均与水足迹优化值同向变动,这表明,城乡二元结构并未改变人水互动关系,而只是用水效率存在差异性。受自然、社会经济发展程度等多种因素交互作用的影响,人口城乡分布在人口规模、用水方式等存在明显差异,乡村人口的主要活动是农业生产,长江经济带农业水足迹占总水足迹的 86.43%,农业用水需求仍是长江经济带水资源供需的重点,因此相较于城镇人口,乡村人口对水足迹的正向影响更强。从人口数量上分析,下游地区城镇人口远多于乡村人口,但下游地区的人口城镇化率与水足迹反方向变动,这与图 1 并不一致。究其原因可知:一方面,优化后的下游地区农业水足迹降低了 41.93%;另一方面,长江经济带下游地区整体人口城镇化率高达 62.24%,远高于 2013 年全国人口城镇化率的 53.73%,高城镇化率带来城市基础设施的完善和产业结构的优化实现了水资源高效利用,同时,城镇居民节水设备的采用和节水意识提升对抑制用水量增长也具有显著作用。

综上所述,水足迹字典序配置中也呈现出城乡二元结构特征。城乡用水效率存在显著差异,相较于城镇人口,乡村人口对水足迹的正向影响更强,水足迹的城乡二元结构本质上反映了城乡基础设施及产业结构的空间差异状态。为进一步辨析产业结构对水足迹公平性配置的影响,针对三次产业的人口就业结构对水足迹配置的影响开展分析。

2. 人口就业结构对水足迹公平性配置影响分析

三次产业的人口就业结构是影响水足迹公平配置的生产特征要素,产业水资源需求是长江经济带水资源供需平衡的关键所在。针对长江经济带人口就业结构异质特征,通过分析各产业就业人口与各产业水足迹优化值的关系,研究人口就业结构对水足迹字典序优化配置的影响(图5)。

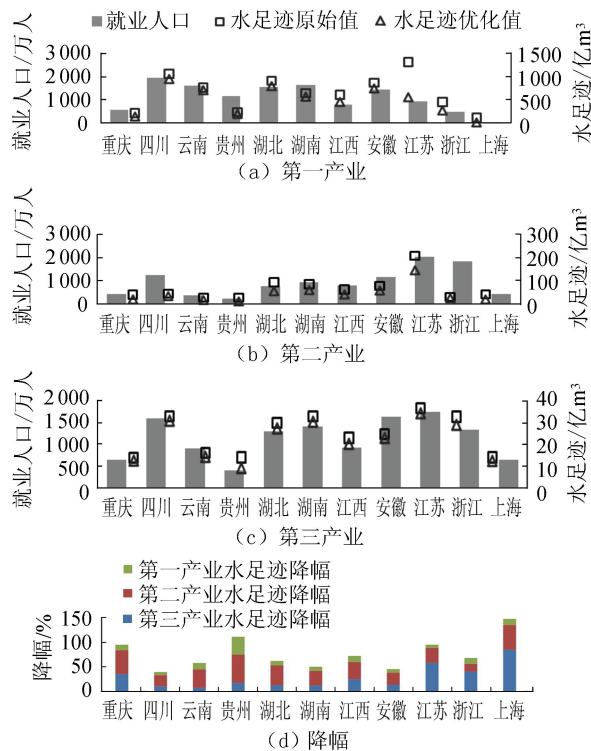


图5 长江经济带就业人口产业分布对水足迹的影响

从图5可以看出,长江经济带总就业人口为3.55亿,三次产业人口规模比约为35:29:36,不同产业的就业人口规模异质性与长江经济带产业结构的劳动力密集程度密切相关。采用字典序算法优化后,长江经济带各省市各产业的水足迹均呈下降趋势,其中,第二产业水足迹降幅达32.81%、第一产业水足迹降幅为24.81%、第三产业水足迹降幅仅为10.57%,这主要是由于第二产业就业人口数量最少导致依人口分配的水足迹量最少。各产业就业人口与各产业水足迹降幅均呈负相关关系,相关系数分别为-0.855、-0.807和-0.717,这表明,依人口的水足迹字典序配置算法能够在降低水资源配置总量的同时满足各行业的人均用水需求,保障水

资源分配的公平性与可行性。

各省一产就业人口数与一产水足迹优化值呈正相关关系,相关系数为0.884。这主要是由于长江经济带是中国重要的商品粮基地,农业生产规模大,但节水灌溉水平低、农业节水意识不强,第一产业人均用水量高达1146.04 m³,在三次产业人均用水量中排在首位。综合考虑各区域就业人口规模与资源禀赋可以发现,长江经济带上游一产就业人口最多,占长江经济带一产总就业人口的43.10%;其次是中游,为32.81%;下游一产就业人口占比最少,仅为24.09%。各区域一产就业人口的排序与其水足迹优化值排序相同,这表明,依人口数量的水足迹字典序配置算法能够有效支撑一产就业人口的用水需求。优化后上、中、下游一产水足迹降幅分别为12.58%、15.99%和41.93%,由此实践优化方案的关键在于因地制宜地制定农业发展策略。

各省二产就业人口数与二产水足迹优化值呈正相关关系,相关系数为0.691。二产就业人口与工业发展密切相关,长江经济带工业人均用水量为818.85 m³,低于农业人均用水量。上、中、下游各区域二产就业人口的比值约为23:25:53,优化后各区域的二产水足迹比值由19:33:48变为18:32:51,水足迹分布与二产就业人口分布更加吻合。优化后上游地区的二产水足迹降幅最大,达到39.12%;下游地区降幅最小,为29.26%。这主要是由于上游地区工业基础薄弱且过度依赖资源型产业,生产技术和设备相对落后,应充分发挥其水资源承载力的平衡指数高的优势,积极做好产业转移承接的同时强化节水,走可持续发展的循环工业经济道路。作为工业大省,浙江省二产水足迹仅为31.36亿m³,下游地区可借鉴浙江工业发展模式,大力发展计算机、通信等高新技术产业和纺织、机电等低耗水产业,不断优化产业结构以实现水资源的高效利用。

各省三产就业人口数与三产水足迹优化值呈正相关关系,相关系数为0.928,在三次产业中对水足迹的正向影响最强,反观长江经济带第三产业人均用水量,仅为216.13 m³,在各产业中的人均用水量最低,用水效率最高。究其原因,长江经济带三产就业人口在三次产业中占比最高,为1.27亿,而较大的就业人口规模及带动的服务人口数量是导致第三

产业就业人口需水加大的主要因素。

上海的一产水足迹在长江经济带中降幅最大,达 83.41%,这主要是因为上海人口城镇化率高达 88%,极高的城镇化水平带动了就业结构升级,一产就业人口仅占上海总就业人口的 4%,高城镇化率也促进了水资源向高效率产业集聚。相对而言,贵州的二、三产水足迹降幅均最大,分别达 56.17% 和 35.73%,这主要受到较低城镇化率的影响。作为长江经济带人类活动强度较低的地区,贵州的人口城镇化率仅为 37.83%,在长江经济带中最低。低水平城镇化率导致一产业就业人口占贵州市总就业人口的 63%,其二、三产业规模小、起点低,导致人均用水效率较低。因此,人口的就业结构差异是各省市产业水足迹降幅不同的关键要素,城镇化率是衡量这一异质性特征的关键指标。

综上所述,人口就业结构也是影响水足迹的关键要素。各产业就业人口均不同程度地拉动用水需求,但对水足迹的影响具有产业差异性,其中作为拉动人口就业的重要渠道,第三产业对水足迹影响最强,水足迹的人口就业结构本质上反映了产业用水效率的空间差异状态。同时,人口就业结构的差异是各省市产业水足迹降幅不同的关键要素。

五、结 论

针对人水冲突加剧的水资源供需矛盾问题,本研究构建了基于人口数量的水足迹字典序优化配置算法,以长江经济带为例,提出了一种基于人口数量的水足迹公平性配置方案,并通过水资源承载力的平衡指数厘清沿线省份水足迹供需结构差异性。在此基础上,考虑人口本身所固有的自然、社会特征,进一步分析人口城乡、就业结构对水足迹字典序配置的影响。

研究成果表明:①人口对水资源供需两端的配置均具有显著影响,长江经济带各区域人均水资源供需不匹配,水资源供需的不均衡现象仍然突出。②水资源承载力的平衡指数呈现“上游>中游>下游”的格局,与各区域人类活动强度的异质性密切相关。因此,水资源承载力的平衡指数应作为城市群建设的先决条件,城市群建设发展必须坚持以水定城的战略方针。③人口作用下的水足迹配置具有

城乡二元结构特征,相较于城镇人口,乡村人口对水足迹具有更强的正向影响。在水足迹配置中应考虑城乡二元结构、统筹谋划人口城乡分布格局时,要充分考虑上、中、下游人口城镇化率和水资源承载力的平衡指数,上、中游地区城镇化水平低,水资源承载力的平衡指数高,应侧重于合理提高城镇化发展速率,充分挖掘水资源利用潜力;经济发达的下游地区水资源承载力的平衡指数最差、资源禀赋与经济冲突形势最为严峻,因此,下游地区侧重增强城市化发展质量,重视建设以水为核心的高质量城市,升级区域产业结构。④人口就业结构也是影响水足迹的关键要素,各产业就业人口对水足迹的影响满足如下关系:第三产业>第一产业>第二产业。长江经济带各省市应根据实际情况在人口城镇化发展的同时注重自身产业结构的调整,经济发展模式由用水效率较低的工业主导型不断向用水效率较高的三次产业主导型转变,以不断优化的产业结构实现水资源的高效利用。

参考文献:

- [1] UNESCO. World water development report 2017: wastewater: an untapped resource[EB/OL]. (2017-03-22)[2018-09-25]. <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002471/247153e.pdf>.
- [2] 吴兆丹, 赵敏, UPMANU LALL, 等. 关于中国水足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 73-80.
- [3] ALLAN T. Virtual water: a long term solution for water short middle eastern economies[M]. London: University of Leeds, 1997: 154-163.
- [4] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Focus, 1992, 6(2): 121-130.
- [5] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[R]. Netherlands: Value of Water Research Report Serien, 2002.
- [6] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products[J]. Water International, 2008, 33(1): 19-32.
- [7] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of

- nations[R]. Netherlands: UNESCO-IHE, 2004.
- [8] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000年的水资源足迹[J]. 冰川冻土, 2003,25(6):94-102.
- [9] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于ESDA的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4):571-582.
- [10] 田贵良, 顾巍, 谢文轩. 基于虚拟水贸易战略的缺水地区用水结构优化研究[J]. 水利经济, 2013,31(1):1-6.
- [11] 王博. 基于水足迹理论的吉林省辽河流域城市化进程中水资源可持续利用评价与优化配置研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
- [12] 刘钢, 王保平, 徐业帅, 等. 长江经济带水足迹结构异化特征及协调发展策略研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2017,19(3):42-48.
- [13] YAGER R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190.
- [14] OGRYCZAK W, SLIWICKI T, WIERZBICKI A. Fair resource allocation schemes and network dimensioning problems[J]. Journal of Telecommunications & Information Technology, 2003, 4(3): 34-42.
- [15] WURBS R A. Assessing water availability under a water rights priority system [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2001, 127(4): 235-243.
- [16] KLEIN R S, LUSS H, SMITH D R. A lexicographic minimax algorithm for multiperiod resource allocation[J]. Mathematical Programming, 1992,55(1):213-234.
- [17] LUSS H, STEPHEN T, TUNCEL L. On equitable resource allocation problems: a lexicographic minimax approach [J]. Operations Research, 1999,47(3):361-376.
- [18] MARCHI E, OVIEDO J A. Lexicographic optimality in the multiple objective linear programming: the nucleolar solution[J]. European Journal of Operational Research, 1992,57(3):355-359.
- [19] PASANDIDEH S H R, NIAKI S T A, NIKNAMFAR A H. Lexicographic max-min approach for an integrated vendor-managed inventory problem[J]. Knowledge-Based Systems, 2014,59(C):58-65.
- [20] NIKNAMFAR A H, NIAKI S T A. Fair profit contract for a carrier collaboration framework in a green hub network under soft time-windows: dual lexicographic max-min approach[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2016(91):129-151.
- [21] BUZN A, KOHÁNI M, JANÁČEK J. An approximative lexicographic min-max approach to the discrete facility location problem[J]. Operations Research Proceedings, 2014(9):71-76.
- [22] LUSS H, SMITH D R. Resource allocation among competing activities: a lexicographic minimax approach [J]. Operations Research Letters, 1986,5(5):227-231.
- [23] WANG L. Cooperative water resources allocation among competing users [D]. Ontario: University of Waterloo, 2005.
- [24] MIMI Z A, SAWALHI B I. A decision tool for allocating the waters of the jordan river basin between all riparian parties[J]. Water Resources Management, 2003,17(6): 447-461.
- [25] PUTE W U, WANG Y, ZHAO X, et al. Spatiotemporal variation in water footprint of grain production in China [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2015,2(2):6582-6586.
- [26] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: a study for China (1978-2008) [J]. Water Research, 2016(94):73-85.
- [27] KANG J, LIN J, ZHAO X, et al. Decomposition of the urban water footprint of food consumption: a case study of Xiamen city[J]. Sustainability, 2017,9(1):135-142.
- [28] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局[J]. 生态学报, 2010,30(5):1312-1321.
- [29] 毋晓琴. 建筑业及第三产业用水调查要点浅析[J]. 山西水利, 2012(9):50-52.
- [30] LIU G, SHI L, LI K W. Equitable allocation of blue and green water footprints based on land-use types: a case study of the Yangtze River Economic Belt [J]. Sustainability, 2018,10(10):3556.
- [31] 皮建才. 领导、追随与社群合作的集体行动:基于公平相容约束的扩展[J]. 经济学(季刊), 2007,6(2): 597-606.
- [32] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3):262-269.
- [33] 刘文静. 大清河流域可利用水资源量演变规律研究 [D]. 邯郸:河北工程大学, 2014.
- [34] FALKENMARK M, WIDSTRAND C. Population and water resources: a delicate balance [J]. Population Bulletin, 1993,47(3):1-36.

(责任编辑:高虹)