

基于 LMDI 的灌溉需水量变化影响因素分解

谢娟, 栗晓玲*

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为研究灌溉需水量的驱动因素, 该文以甘肃省武威市为研究区, 基于扩展的 Kaya 恒等式构建灌溉需水量因素分解模型, 利用对数平均迪氏指数分解法 (logarithmic mean Divisia index, LMDI) 对武威市 1995—2012 年总体及不同时段灌溉需水量驱动因子进行因素分解, 并计算灌溉需水量的影响因素的效应值。结果表明: 近 18 a 来, 武威市各行政区以节水高效为目的对武威种植结构进行了大幅调整, 减少了高耗水作物小麦的种植面积, 增加了耐旱的玉米、棉花等作物的种植面积; 在 1995—2012 年间, 武威市灌溉需水量减少了 $5.023 \times 10^8 \text{ m}^3$, 种植规模效应、种植结构效应、气候变化效应、节水工程效应分别为 $2.435 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-3.994 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-1.286 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-2.178 \times 10^8 \text{ m}^3$; 不同作物对灌溉需水量增长的效应不同, 其中小麦抑制灌溉需水量增长, 是灌溉需水量减少的最主要影响因子; 4 个分解效应在不同时段对武威市各县灌溉需水量作用不同, 但除在 2000—2005 年对凉州区灌溉需水量增加有微弱的促进作用外, 种植结构效应在不同时段均表现为抑制灌溉需水量增长的作用。研究结果为合理调控农业发展规划, 制定武威市灌溉用水规划提供参考。

关键词: 灌溉; 气候变化; 蒸发蒸腾量; 需水量; 因素分解; LMDI; 武威市

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.016

中图分类号: TV213; S74.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0123-09

谢娟, 栗晓玲. 基于 LMDI 的灌溉需水量变化影响因素分解[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 123—131. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.016 <http://www.tcsae.org>

Xie Juan, Su Xiaoling. Decomposition of influencing factors on irrigation water requirement based on LMDI method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 123—131. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业是水资源消耗最大的行业, 作为农业大国, 受人口、经济的快速发展以及全球气候变化的双重影响, 中国农业面临着巨大挑战, 农业水资源短缺和灌溉水利用率低的问题一直存在^[1-2]。在干旱地区, 灌溉用水量占农业用水量的 90%左右, 灌溉需水量作为影响农业用水量的关键因素, 是农业节水规划的重要依据^[3]。灌溉需水量受气候、种植规模、种植结构及节水工程技术等因素综合影响。气候变化通过影响作物需水, 从而影响灌溉需水量; 适度的种植规模和合理的种植结构可以充分挖掘农业节水潜力, 保障农业发展; 节水工程通过改进灌溉设施、输水方式和灌溉方式等减少灌溉水的损失来减少灌溉需水量^[4]。在水资源短缺、农业水资源供需矛盾日益突出的现实条件下, 从灌溉需水量的影响因素入手, 寻找降低灌溉需水量的有效途径已成为当务之急。因此, 研究灌溉需水量的变化及其影响因素, 定量分析各因素的影响效应, 对合理调控农业规模、挖掘农业节水

潜力、配置区域农业用水结构、保障农业健康可持续发展具有重要意义。

目前, 研究灌溉需水量主要从以下 2 个方面: 1) 从作物需水的角度, 研究未来气候变化下农业需水量的变化, 并进行供需平衡分析, 指导农业用水规划。如 Wang 等^[5]依据气候、灌溉需水量、农业措施之间的关系建立灌溉需水量系统动力学模型, 模拟 3 种气候情境下宝鸡峡灌区灌溉需水量; 王卫光等^[6]基于历史气象资料和大气环流模式 HadCM3 的统计降尺度数据, 分析了气候变化下长江中下游水稻灌溉需水时空变化特征。2) 从优化种植结构的角度挖掘农业节水潜力, 降低农业需水量。如高明杰等^[7-8]在考虑社会、经济、生态协调发展的目标下, 构建区域节水高效种植结构调整的多目标模糊优化模型, 提出各区域节水高效种植优化调整方案。关于灌溉需水量影响因子方面的研究相对较少, 并且研究主要偏重于灌溉需水量与相关影响因子定性分析, 缺乏定量的对比。如 Ma 等^[9]利用多元线性回归分析法分析中国华北平原灌溉需水量驱动因子, 得出灌溉需水量主要驱动因子是小麦和蔬菜种植面积增加; 马黎华等^[10]对石羊河流域农业净灌溉需水量与其宏观驱动因子 (如人口、城镇化率、灌溉面积、降水等) 进行相关性分析, 并在此基础上建立农业净灌溉需水量模型; 张翠芳等^[11]针对民勤县典型年的特点设定情景, 对比 3 种情景的变化, 估算种植面积、种植结构调整、节水灌溉技术 3 项农业节水措施的相对潜力。

因素分解法由 Ang 等^[12]提出, 用于分析不同驱动因

收稿日期: 2016-08-13 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51279166、91425302)

作者简介: 谢娟, 女, 湖北孝感人, 主要从事水量转化理论与调控技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: 1508900196@qq.com。

*通信作者: 栗晓玲, 女, 四川开江人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水资源规划与管理研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: suxiaoling17@126.com。

子的变化对研究对象的影响程度。指数分解法 (index decomposition analysis, IDA) 是因素分解法的常用形式之一, 包括 Laspeyres 指数分解与 Divisia 指数分解, 它对数据资料要求低, 分解方法简单、灵活, 分解结构, 有加法分解和乘法分解 2 种形式, 在变量的时空分析上优势明显^[13-14]。Ang 等在 Divisia 指数分解的基础上进行改进, 提出对数平均迪氏指数分解法 (logarithmic mean Divisia index, LMDI), 该方法有效解决分解过程中剩余问题, 提供了对数平均权重方程, 兼并分解数量指标和强度指标的优势, 在环境经济和能源消费领域得到广泛应用^[15-18]。

LMDI 分解法的先进性与灵活性使该分解方法不断应用于很多领域政策的制定与研究, 一些学者将该方法应用于水资源利用方面, 如 Zhang 等^[19]以乌鲁木齐为研究区, 利用 LMDI 分解法对总水资源利用量的影响因素进行分析, 并计算各驱动因素相对贡献率, 得出经济发展水平、水资源利用效率、工业用水结构、工业产业发展以及工业用水效率是影响水资源利用量和利用效率的决定因素; 张礼兵等^[20]根据不同工业部门用水以及总用水情况利用 LMDI 分解方法分析了安徽省工业用水变化的影响因素; 孙才志等^[21]综合考虑产业用水效率、产业用水结构、经济水平、水资源禀赋及水资源开发利用率 5 个因素, 采用 LMDI 分解方法对 1997—2008 年中国用水效率的变化进行分解分析, 计算各因素的相对贡献率, 测度各因素的影响程度和方向; Zhao 等^[22]采用 LMDI 分解法对中国农业水足迹的驱动因素进行了分析, 主要考虑作物水足迹结构、农业用水效率、农业经济以及人口规模 4 个因素, 通过对比分析, 得出经济效应是促进中国水足迹增长的最关键因素, 其次为人口和水足迹结构效应。但 LMDI 分解法在农业灌溉需水方面的研究十分少见。

为了更加全面深入地探讨灌溉需水量变化的内在影响机制, 定量分析各驱动因素变化对区域灌溉需水量的影响, 评价目前区域农业发展形势是否有利于降低灌溉需水量, 本文从影响农业用水的关键因素—灌溉需水出发, 基于扩展的 Kaya 恒等式, 综合考虑种植规模、种植结构、气候变化、节水工程 4 个影响因素, 建立灌溉需水的因素分解模型, 应用 LMDI 因素分解方法, 以甘肃省武威市为研究区, 分析 4 个影响因素在不同阶段对灌溉需水的影响, 比较各因素对需水变化的贡献率, 探讨影响灌溉需水量变化的关键因素, 旨在为寻求区域健康的农业发展模式、科学地降低灌溉需水量的途径提供依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 灌溉需水量的计算

本研究采用 Penman-Monteith 公式结合单作物系数法计算灌溉需水量, 涉及作物生育期作物系数的选取、参考作物蒸发蒸腾量及有效降雨的计算。

参考作物蒸发蒸腾量的计算: 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算, 该方法结合了能量平衡法和

空气动力学的方法, 考虑了温度、净辐射、风速、水汽压等因素的影响, 在中国有较强的适用性。其表达式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

式中 ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; R_n 为作物表面净辐射通量, MJ/(m²·d); G 为土壤热通量, MJ/(m²·d); γ 为湿度计常数, kPa/°C; T 为空气的平均温度 ($T = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2}$), T_{\min} 、 T_{\max} 为空气的最高、最低温度, °C; U_2 为地面以上 2 m 处的风速, m/s; e_s 为空气饱和水汽压, kPa; e_a 为空气实际水汽压, kPa; Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率, kPa/°C。

作物生育期有效降雨计算: 本研究采用如下公式^[23]:

$$P_e = \sum_{i=k}^{k+m} \sigma \cdot P_i \quad (2)$$

式中 P_e 为作物生育期有效降雨量, mm; i 为日期, 月·日; k 为作物生育期的开始时间, 月·日; m 为生育期的长度, d; P_i 为日降雨量, mm; σ 为降雨量有效利用系数, 其中 $P_i < 5$ mm 时, $\sigma = 0$; $5 \text{ mm} \leq P_i \leq 50$ mm 时, $\sigma = 1$; $P_i > 50$ mm 时, $\sigma = 0.8$ 。

作物净灌溉定额的计算: 武威市分属于石羊河流域, 流域地下水埋深大部分大于 5 m, 可忽略地下水的补给, 各作物净灌溉定额计算公式如下^[24]:

$$I = \sum_{i=k}^{k+m} K_{ci} \cdot ET_{0i} - P_e = ET_c - P_e \quad (3)$$

式中 I 为作物净灌溉定额, mm; K_c 为作物生育期作物系数; ET_c 为作物全生育期蒸发蒸腾量, mm。

灌溉需水量计算: 计算公式如下^[24]:

$$W = \frac{1}{1000} \sum_{j=1}^n (I_j \cdot A_j) / \eta \quad (4)$$

式中 W 为灌溉需水量, 10⁸ m³; j 表示不同的作物; n 表示作物的种类数; A_j 为第 j 种作物的种植面积, 10⁴ hm²; η 为灌溉水利用系数。

1.2 农业灌溉需水量因素分解模型

Kaya 恒等式由日本 Yoichi Kaya 教授于 1990 年第 1 次 IPCC 研讨会上提出, 成为测算碳排放量的第 1 种比较传统的方法, 本文基于 Kaya 恒等及其扩展式^[21], 提出灌溉需水量的分解模型如下:

$$W = \sum_{j=1}^n W_j = \sum_{j=1}^n \frac{w_j}{\eta} = \sum_{j=1}^n A_j \cdot \frac{A_j}{A} \cdot \frac{w_j}{A_j} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (5)$$

式中 w_j 第 j 种作物的净灌溉需水量, 10⁸ m³; A 为总种植面积, 10⁴ hm²。

由式 (5) 可以得出第 t 年的灌溉需水 W_t 可表示为

$$W_t = \sum_{j=1}^n W_{tj} = \sum_{j=1}^n \frac{w_{tj}}{\eta_t} = \sum_{j=1}^n A_t \cdot \frac{A_{tj}}{A_t} \cdot \frac{w_{tj}}{A_{tj}} \cdot \frac{1}{\eta_t} = \sum_{j=1}^n A_t \cdot a_{tj} \cdot I_{tj} \cdot C_t \quad (6)$$

式中 A_t 表示第 t 年的种植面积, 10^4 hm^2 , 反映第 t 年种植规模; $a_{ij}=A_{ij}/A_t$ 表示第 t 年第 j 种作物种植面积占这年总种植面积的比例, 反映第 t 年种植结构; $I_{ij}=w_{ij}/A_{ij}$ 表示第 t 年第 j 种作物的净灌溉定额, mm, 其值与 ET_0 、作物系数及作物生育期的有效降雨有关, 由于 ET_0 根据 Penman-Monteith 公式计算, 其值与平均气温、日照时数、水汽压等气象要素有关, 因此 I_{ij} 是受气候变化影响的, 其值的变化反映气候变化对作物灌溉需水的影响。 $C_t=1/\eta_t$, η_t 表示第 t 年灌溉水利用系数, 其值与田间水利建设情况、节水工程、灌水技术等因素有关, 反映节水工程技术对灌溉需水量的影响。

1.3 灌溉需水量的 LMDI 分解模式

LMDI 分解模式有加法和乘法模式 2 种^[25], 2 种模式通过一定数学方法可以相互转化。

1.3.1 灌溉需水量的 LMDI 加法分解模式

灌溉需水量的变化量是由种植规模、种植结构、气候变化以及节水工程的变化引起的, 因此灌溉需水量的 LMDI 加法分解模式可表示为

$$\Delta W_{tot} = \Delta W_A + \Delta W_a + \Delta W_I + \Delta W_C \quad (7)$$

式中 ΔW_{tot} 表示灌溉需水量的变化量, 其值为各因素效应之和, 即为基于加法分解的总效应, 是灌溉需水量总的变化量, 10^8 m^3 ; ΔW_A 表示基于加法分解的种植规模效应, 反映种植规模的变动对灌溉需水量变化的影响, 10^8 m^3 ; ΔW_a 表示基于加法分解的种植结构效应, 反映种植结构调整对灌溉需水量的影响, 用于评价种植结构的调整是否合理, 10^8 m^3 ; ΔW_I 表示基于加法分解的气候变化效应, 反映气候变化对灌溉需水量变化的影响, 10^8 m^3 ; ΔW_C 表示基于加法分解的节水工程效应, 对应灌溉水利用系数的变动对灌溉需水量的影响, 10^8 m^3 。各因素的灌溉需水效应计算公式如下:

基于加法分解的种植规模效应:

$$\Delta W_A = \sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j})}{(\ln W_{ij} - \ln W_{0j})} \cdot \ln \left(\frac{A_t}{A_0} \right) \quad (8)$$

基于加法分解的种植结构效应:

$$\Delta W_a = \sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j})}{(\ln W_{ij} - \ln W_{0j})} \cdot \ln \left(\frac{a_{ij}}{a_{0j}} \right) \quad (9)$$

基于加法分解的气候变化效应:

$$\Delta W_I = \sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j})}{(\ln W_{ij} - \ln W_{0j})} \cdot \ln \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \quad (10)$$

基于加法分解的节水工程效应:

$$\Delta W_C = \sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j})}{(\ln W_{ij} - \ln W_{0j})} \cdot \ln \left(\frac{C_{ij}}{C_{0j}} \right) \quad (11)$$

加法分解模式下, 各因素的效应值 >0 表现为促进增长的作用, <0 表现为抑制增长的作用, 绝对值越大促进与抑制作用越明显, 若等于 0, 则说明对灌溉需水量变化没有明显的影响。

1.3.2 灌溉需水量的 LMDI 乘法分解模式

乘法分解模式下, 灌溉需水量的 LMDI 分解表达式为

$$D_{tot} = W_t / W_0 = D_A \cdot D_a \cdot D_I \cdot D_C \quad (12)$$

式中 D_{tot} 表示为第 t 年与基准年灌溉需水量的比值, 其值为各因素的效应之积, 即为基于乘法分解的总效应; D_A 表示基于乘法分解的种植规模效应; D_a 表示基于乘法分解的种植结构效应; D_I 表示基于乘法分解的气候变化效应; D_C 表示基于乘法分解的节水工程效应。

基于乘法分解的种植规模效应:

$$D_A = \exp \left[\sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j}) / (\ln W_{ij} - \ln W_{0j})}{(W_t - W_0) / (\ln W_t - \ln W_0)} \cdot \ln \left(\frac{A_t}{A_0} \right) \right] \quad (13)$$

基于乘法分解的种植结构效应:

$$D_a = \exp \left[\sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j}) / (\ln W_{ij} - \ln W_{0j})}{(W_t - W_0) / (\ln W_t - \ln W_0)} \cdot \ln \left(\frac{a_{ij}}{a_{0j}} \right) \right] \quad (14)$$

基于乘法分解的气候变化效应:

$$D_I = \exp \left[\sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j}) / (\ln W_{ij} - \ln W_{0j})}{(W_t - W_0) / (\ln W_t - \ln W_0)} \cdot \ln \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \right] \quad (15)$$

基于乘法分解的节水工程效应:

$$D_C = \exp \left[\sum_{j=1}^n \frac{(W_{ij} - W_{0j}) / (\ln W_{ij} - \ln W_{0j})}{(W_t - W_0) / (\ln W_t - \ln W_0)} \cdot \ln \left(\frac{C_{ij}}{C_{0j}} \right) \right] \quad (16)$$

乘法分解模式下, 各因素的效应值 >1 , 则表现为促进灌溉需水量增长作用, <1 则表现为抑制灌溉需水量增长的作用。与 1 的偏离越大, 抑制与促进作用越明显, 等于 1 说明没有明显影响。

1.4 研究区概况与数据来源

1.4.1 研究区概况

武威市位于甘肃省中部, 河西走廊东端, 地处 $101^\circ 49' \sim 104^\circ 43' \text{E}$ 、 $36^\circ 9' \sim 39^\circ 27' \text{N}$ 。全市主要分属于石羊河流域, 包括凉州区、古浪县、天祝县和民勤县。武威市除祁连高寒山区外, 大部分地方气候干燥, 降水稀少, 蒸发强烈, 水资源短缺, 属于甘肃省传统农业区, 农作物种类多样, 其中粮食作物包括小麦、玉米、洋芋等, 经济作物包括棉花、油料、甜椒等, 其他作物包括苜蓿、瓜类、苹果、梨等。该地区农业的发展主要依靠农田灌溉, 据 2014 年水资源公报统计^[26], 农业用水总量 $14.258 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中农田灌溉用水占农业用水总量的 92%。从 2002 年开始, 针对石羊河流域极度恶化的生态环境, 甘肃省编制了石羊河流域治理规划, 以全面建设节水型社会为主线, 以生态环境保护为根本, 以水资源合理配置、节约和保护为核心, 以经济社会可持续发展为目标, 按照下游抢救民勤绿洲, 中游恢复生态环境, 上游保护水资源的总体思路, 对石羊河流域进行重点治理, 并于 2003 年正式启动, 随着治理工作不断推进, 取得了较好的治理效果, 现今已经进入后期治理阶段, 鉴于此, 本研究选取 1995 年、2000 年、2005 年、2012 年为典型年, 分析农业灌溉需水变化的影响因素。

1.4.2 数据来源

武威市各区县作物种植面积来源于各年份武威统计年鉴^[27], 气象资料来源于中国气象局国家气象信息中心, 选取祁连山区乌鞘岭、古浪、武威、民勤 4 个气象站的

气象数据。作物系数 K_c 的取值参考佟玲^[28]研究成果, 灌溉水利用系数的取值参考吕廷波等^[29-30]相关研究成果, 选取典型灌区计算区域灌溉水利用系数, 计算统计结果见表 1。

表 1 武威市各县区灌溉水利用系数
Table 1 Utilization coefficient of irrigation water in each county of Wuwei city

| 年份 Years | 武威 Wuwei | 凉州 Liangzhou | 民勤 Minqin | 古浪 Gulang | 天祝 Tianzhu |
|----------|----------|--------------|-----------|-----------|------------|
| 1995 | 46.4 | 45.5 | 47.0 | 51.0 | 36.2 |
| 2000 | 47.3 | 49.6 | 48.3 | 46.0 | 31.9 |
| 2005 | 54.1 | 53.6 | 54.2 | 62.8 | 30.9 |
| 2012 | 52.6 | 51.1 | 50.2 | 63.2 | 50.8 |

2 结果与分析

2.1 武威市各区县灌溉需水量分析

利用式 (4) 计算武威市各区县灌溉需水量, 有些作物的 K_c 值不确定, 则选择与其同类且生育期相近的作物 K_c 值予以代替, 其中甜菜、蔬菜的 K_c 值按照甜椒 K_c 值计算, 青饲料、绿肥、花卉和药材的 K_c 值按照苜蓿 K_c 值计算, 胡麻籽、油菜等油料 K_c 值按照胡麻 K_c 值计算, 杏园、枣园和其他果园 K_c 值按照苹果 K_c 值计算。 K_c 取值相同的作物, 生育期相同, 因此, 在面积统计和灌溉需水量计算时合并为同一种作物。武威市及各区县灌溉需水量的变化如图 1 所示。

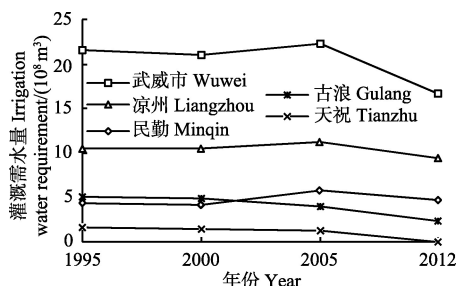


图 1 武威市各区县不同年份灌溉需水量
Fig.1 Irrigation water requirement in different years of each county of Wuwei city

由图 1 可知, 石羊河流域综合治理对于降低武威市各区县灌溉需水量有一定的作用, 1995—2012 年武威市各区县灌溉需水量总量除民勤县有微弱增加外其他区县均减少。分析武威市整体以及各区县灌溉需水量的变化可以得出, 古浪县和天祝县灌溉需水量持续降低, 武威市以及凉州区在 2005 年有增加的波动后, 在 2012 年灌溉需水量又恢复降低情势。

2.2 武威市净灌溉定额分析

根据式 (3) 计算武威市各区县作物净灌溉定额, 武威市不同作物净灌溉定额根据各区县作物灌溉定额以及作物种植面积, 采用面积加权法计算得出, 计算结果如表 2。

由表 2 可知, 小麦、甜椒、梨在各年份灌溉定额较高, 相对该地区其他作物属于高耗水作物, 玉米、苹果各年份灌溉定额较低, 相对大部分作物属于低耗水作物。作物净灌溉定额主要受农作物生育期需水和生育期有效降雨影响, 由于各种作物生育期不同, 且每个年份降雨

年内分配有差异, 因此各种作物的灌溉定额在不同年份没有表现出特殊的规律, 但是比较 4 个不同的年份可以发现, 整体来看, 各种作物在 2005 年净灌溉定额最大, 而 2012 年最小。

表 2 武威市各种作物不同年份净灌溉定额

Table 2 Net irrigation quota of various crops in Wuwei city in different years mm

| 作物 Crops | 1995 年 | 2000 年 | 2005 年 | 2012 年 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 小麦 Wheat | 528 | 503 | 558 | 432 |
| 玉米 Maize | 192 | 251 | 280 | 248 |
| 棉花 Cotton | 302 | 306 | 341 | 290 |
| 油料 Oli crops | 365 | 343 | 425 | 374 |
| 苜蓿 Alfalfa | 374 | 396 | 521 | 342 |
| 洋芋 Potato | 255 | 246 | 347 | 200 |
| 甜椒 Pimento | 482 | 446 | 539 | 450 |
| 苹果 Apple | 148 | 190 | 293 | 212 |
| 梨 Pear | 422 | 444 | 505 | 409 |
| 瓜类 Melon | 331 | 353 | 391 | 329 |

2.3 武威市及各区县种植结构分析

根据武威市统计年鉴统计武威市各区县作物种植面积, 其变化如图 2 所示。

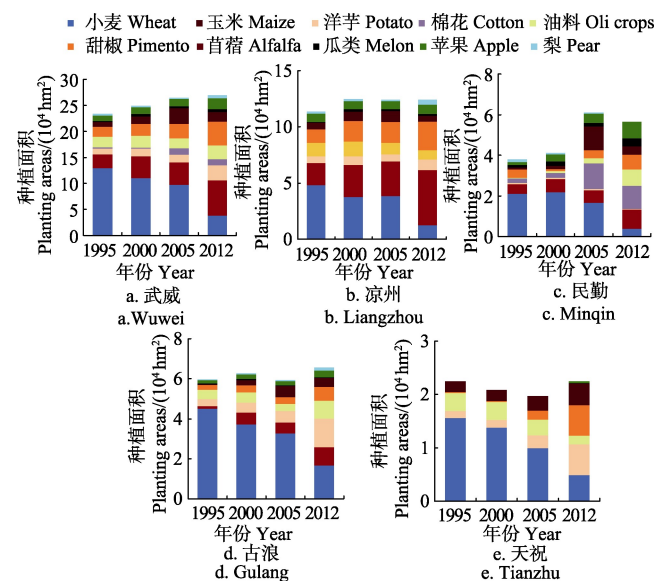


图 2 武威市各区县不同年份作物种植面积

Fig.2 Planting areas of various crops in each county of Wuwei city in different years

由图 2 可知: 1) 1995—2012 年全市总种植面积呈现增加情势, 由 1995 年 $23.345 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 2012 年 $26.879 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。凉州区、民勤县、古浪县、天祝县总种植面积在 1995—2012 年波动变化, 其中民勤县在 2000—2005 年间种植面积增加比较明显。从粮经作物种植面积变化可以看出, 武威市压减了粮食作物的种植比例, 增加了经济作物的种植比例, 粮经作物种植面积变化比较明显的区县主要是民勤县、古浪县和天祝县; 2) 从种植结构看, 1995—2012 年武威市对种植结构进行了大规模的调整, 主要作物小麦、玉米、棉花、洋芋、甜椒种植面积由 1995 年的 12.97:2.59:0.22:1.17:1.91 调整为 2012 年的 3.82:6.78:1.15:2.93:4.52, 其中小麦种植面积逐

渐减小，减少量为 $9.155 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，减少幅度达 71%，玉米、棉花、洋芋、甜椒种植面积逐渐增大，增加量分别为 $4.191 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $0.928 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $1.762 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $2.614 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，其他作物的种植面积均有不同程度增加，武威市各区县的种植结构的变化和武威市整体上有相似之处，各区县主要作物的种植面积均发生了变化，其中小麦种植面积在各区县均减少，玉米种植面积除天祝县无种植外，在其他县区增加明显；棉花种植面积在民勤县明显增加。

2.4 灌溉需水量因素分解结果与分析

LMDI 的 2 种分解模式可以相互转化和印证。加法模式的分解结果能更好地表现各影响因素对灌溉需水量变

化的贡献，简洁、直观。而乘法模式的分解结果则可以表现各影响因素对灌溉需水量变化的影响程度，即相对贡献量，可以用于对比不同区域灌溉需水量的变化情况以及各影响因素变化对灌溉需水量影响程度。研究区各区县灌溉需水量存在差异，选取加法分解模式和乘法分解模式分别对 1995—2012 年武威各区县灌溉需水量总体变化和武威市不同阶段灌溉需水量变化进行因素分解。

2.4.1 武威各区县灌溉需水量因素分解结果

利用式（7）～式（11）对武威各地区 1995—2012 年灌溉需水量在加法模式下进行因素分解，计算灌溉需水量变化的种植规模效应、种植结构效应、气候变化效应、节水工程效应，结果见表 3。

表 3 1995—2012 年武威市灌溉需水量变化的 LMDI 加法分解结果
Table 3 Results of LMDI's addition decomposition to irrigation water requirement change in each county of Wuwei city during 1995—2012

| 作物 Crops | 武威 Wuwei | | | | | 凉州 Liangzhou | | | | | 民勤 Minqin | | | | |
|--------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| | ΔW_A | ΔW_a | ΔW_I | ΔW_C | ΔW_{tot} | ΔW_A | ΔW_a | ΔW_I | ΔW_C | ΔW_{tot} | ΔW_A | ΔW_a | ΔW_I | ΔW_C | ΔW_{tot} |
| | 10 ⁸ m ³ | | | | | | | | | | | | | | |
| 小麦 Wheat | 1.057 | -10.234 | -1.503 | -0.946 | -11.626 | 0.314 | -4.883 | 0.253 | -0.401 | -4.717 | 0.527 | -2.757 | -0.035 | -0.086 | -2.352 |
| 玉米 Maize | 0.275 | 1.601 | 0.497 | -0.246 | 2.127 | 0.130 | 1.161 | 0.620 | -0.167 | 1.745 | 0.182 | 0.131 | 0.021 | -0.030 | 0.305 |
| 棉花 Cotton | 0.046 | 0.498 | -0.014 | -0.042 | 0.490 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.135 | 0.423 | -0.014 | -0.022 | 0.522 |
| 油料 Oli crops | 0.246 | 0.263 | 0.040 | -0.220 | 0.329 | 0.079 | -0.363 | 0.139 | -0.101 | -0.246 | 0.100 | 0.673 | -0.016 | -0.016 | 0.740 |
| 苜蓿 Alfalfa | 0.129 | 0.507 | -0.083 | -0.116 | 0.438 | 0.045 | -0.101 | 0.136 | -0.057 | 0.022 | 0.106 | 0.282 | -0.007 | -0.017 | 0.364 |
| 洋芋 Potato | 0.121 | 0.667 | -0.211 | -0.108 | 0.469 | 0.047 | 0.158 | 0.175 | -0.061 | 0.320 | 0.013 | -0.044 | -0.001 | -0.002 | -0.034 |
| 甜椒 Pimento | 0.398 | 2.037 | -0.195 | -0.356 | 1.884 | 0.165 | 1.148 | 0.294 | -0.211 | 1.396 | 0.276 | 0.119 | -0.031 | -0.045 | 0.319 |
| 苹果 Apple | 0.077 | 0.279 | 0.196 | -0.068 | 0.483 | 0.021 | 0.016 | 0.090 | -0.027 | 0.100 | 0.102 | 0.338 | -0.014 | -0.017 | 0.409 |
| 梨 Pear | 0.050 | 0.174 | -0.011 | -0.044 | 0.168 | 0.022 | 0.194 | 0.071 | -0.028 | 0.258 | 0.014 | -0.129 | -0.001 | -0.002 | -0.118 |
| 瓜类 Melon | 0.037 | 0.213 | -0.002 | -0.033 | 0.216 | 0.005 | 0.064 | 0.009 | -0.007 | 0.071 | 0.074 | 0.127 | -0.014 | -0.012 | 0.175 |
| 小计 Total | 2.435 | -3.994 | -1.286 | -2.178 | -5.023 | 0.829 | -2.605 | 1.786 | -1.060 | -1.049 | 1.531 | -0.838 | -0.113 | -0.249 | 0.330 |

| 作物 Crops | 古浪 Gulang | | | | | 天祝 Tianzhu | | | | |
|--------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| | ΔW_A | ΔW_a | ΔW_I | ΔW_C | ΔW_{tot} | ΔW_A | ΔW_a | ΔW_I | ΔW_C | ΔW_{tot} |
| | 10 ⁸ m ³ | | | | | | | | | |
| 小麦 Wheat | 0.205 | -2.376 | -0.717 | -0.467 | -3.355 | 0.000 | -0.312 | -0.846 | -0.090 | -1.248 |
| 玉米 Maize | 0.007 | 0.143 | 0.003 | -0.016 | 0.137 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 棉花 Cotton | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 油料 Oli crops | 0.033 | 0.205 | -0.140 | -0.076 | 0.023 | 0.000 | -0.009 | -0.227 | -0.004 | -0.240 |
| 苜蓿 Alfalfa | 0.007 | 0.173 | -0.019 | -0.015 | 0.146 | 0.000 | 0.005 | -0.126 | -0.002 | -0.123 |
| 洋芋 Potato | 0.022 | 0.305 | -0.085 | -0.051 | 0.191 | 0.000 | 0.005 | -0.066 | -0.001 | -0.062 |
| 甜椒 Pimento | 0.027 | 0.273 | -0.072 | -0.061 | 0.166 | 0.000 | 0.118 | -0.061 | -0.012 | 0.045 |
| 苹果 Apple | 0.004 | 0.024 | -0.020 | -0.009 | -0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 梨 Pear | 0.002 | 0.044 | -0.009 | -0.005 | 0.031 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 瓜类 Melon | 0.001 | -0.007 | -0.005 | -0.003 | -0.013 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 小计 Total | 0.309 | -1.217 | -1.064 | -0.703 | -2.675 | 0.000 | -0.192 | -1.326 | -0.110 | -1.628 |

注： ΔW_A 为种植规模效应值； ΔW_a 为种植结构效应值； ΔW_I 为气候效应值； ΔW_C 为节水工程效应值； ΔW_{tot} 为总效应值。
Note: ΔW_A is planting scale effect; ΔW_a is planting structure effect; ΔW_I is climate change effect; ΔW_C is water saving engineering effect; ΔW_{tot} is total effect.

由表 3 可知：1) 1995—2012 年武威市灌溉需水量减少了 $5.023 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，种植规模效应、种植结构效应、气候变化效应、节水工程效应分别为 $2.435 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-3.994 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-1.286 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-2.178 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，对比 4 个分解效应值大小可以发现，种植结构效应贡献最大，其次是种植规模效应、节水工程效应和气候效应。可见，种植结

构调整是灌溉需水量减少的主要驱动因素。2) 从各区县总效应分析，凉州区、古浪县、天祝县表现为灌溉需水量的减少，民勤县为灌溉需水量增加，但增加幅度不大；种植规模效应在凉州区、民勤县、古浪县均表现为促进增长作用，其中民勤县种植规模效应在全市总种植规模效应的促进作用中贡献最大，是民勤县灌溉需水量增加

的主效应,而天祝县由于种植面积变化不大,因此种植规模效应趋近于0;种植结构效应在武威市各区县均小于0,表现为抑制灌溉需水量增长的作用,其中凉州区和古浪县作用明显,是灌溉需水量减少的主要驱动因子;节水工程效应在凉州区、民勤县、古浪县、天祝县均小于0,表明1995—2012年,武威市各区县节水工程的完善与节水技术水平的提高有效地抑制了灌溉需水量的增长;气候变化效应对各县区的灌溉需水影响不同,凉州区表现为促进增长效应,民勤、古浪、天祝表现为抑制增长的作用,其中天祝县气候变化为该县抑制灌溉需水量增长的最主要的影响因素,并且远远高于其他效应。3)根据不同作物对灌溉需水量影响因素分解结果可知,大部分作物种植结构效应大于种植规模效应,表明武威市各区县种植结构调整对灌溉需水量的调控作用大于种植规模的变化对灌溉需水量的影响,种植结构调整合理。小麦作为抑制灌溉需水量增长的主要作物,在凉州、民勤、古浪、天祝及武威市总体上总效应值分别为 $-4.717 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-2.352 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-3.355 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-1.248 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $-11.626 \times 10^8 \text{ m}^3$,效应值远远大于其他作物。除天祝县外,玉米、甜椒对灌溉需水量的增加起促进作用,在凉州区作用最明显,达到该区所有正效应总和的80.3%。棉花、油料是民勤县灌溉需水量增加主效应。

2.4.2 武威市不同阶段灌溉需水因素分解结果

为了比较不同区县不同时段种植规模效应、种植结构效应、气候变化效应、节水工程效应的强度大小,利用式(12)~式(16)对武威各县区灌溉需水量的变化量进行乘法模式下的因素分解,分解结果如图3所示。

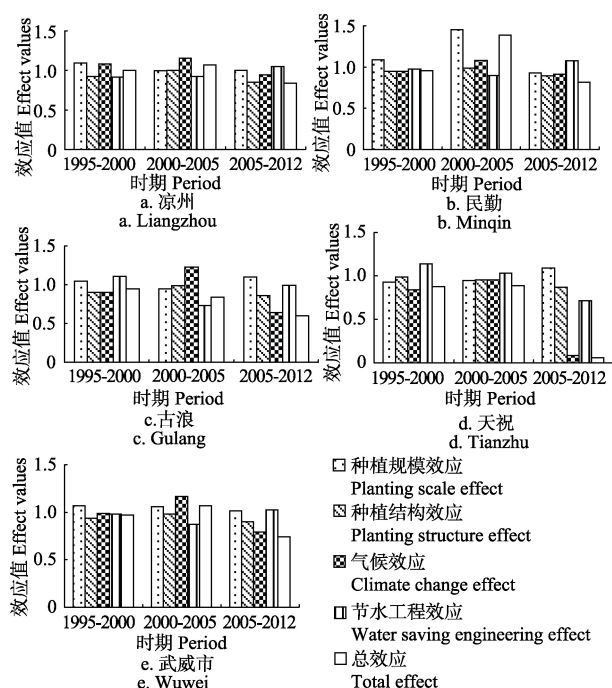


图3 武威市各区县灌溉需水变化的乘法分解结果

Fig.3 Results of LMDI's multiplication decomposition to irrigation water requirement change in each county of Wuwei city

将各效应分解结果与1比较,可得:1)由图3a可知,凉州地区在2000—2005年、2005—2012年2个时段灌溉需水量变化相对明显,2000—2005年灌溉需水量增长,气候变化促进灌溉需水量的增长,且在总效应中贡献最大,其他分解效应均小于1,抑制灌溉需水量的增长。2005—2012年总效应为0.839,小于1,表现为灌溉需水量的减少,是由种植规模效应、种植结构效应、气候变化效应的共同抑制的结果,主要驱动因素是种植结构变化,而节水工程效应大于1,对灌溉需水量表现为微弱的增加效应。2)由图3b可知,民勤县灌溉需水量出现先减少后增加再减少的情势,结合前述种植面积分析可知产生这种变化的原因是2003年对民勤绿洲的恢复治理,从图中也可以看出,2000—2005年种植规模效应明显,达到1.449,是该时段灌溉需水量增加的主效应;2005—2012年,灌溉需水量相对减少,除了可以调控的种植规模效应、种植结构效应外,气候变化对灌溉需水量的减少也起到了一定的促进作用。3)由图3c可知,从总效应看,古浪县在1995—2000年、2000—2005年、2005—2012年3个时段灌溉需水量逐渐减少,且减少幅度越来越大,但各时段4个分解效应的作用并不相同。1995—2000年种植结构和气候变化有利于降低灌溉需水量,效应值分别为0.899、0.903,而种植规模和节水工程促进灌溉需水量增长;2000—2005年气候变化效应为明显的促进增长作用,效应值为1.223,节水工程效应为灌溉需水量减少的主效应,效应值为0.735;而2005—2012年气候变化效应表现为明显的抑制增长的作用,效应值为0.638,是该时段灌溉需水量减少的主效应,同时该时段种植结构调整对灌溉需水量增加起到一定的抑制作用,效应值为0.859。4)由图3d可知,从天祝县在1995—2000年、2000—2005年、2005—2012年3个时段灌溉需水量均减少,2005—2012年减少效应明显,主导因子是气候变化,而该时段气候变化效应在其他地区均小于1,效应强度弱于天祝县。可见,这一时段各区县气候更有利于作物生长。对比不同时段节水工程效应可以看出其变化由促进灌溉需水量增长逐渐演变为抑制增长作用,该县在“十一五”、“十二五”期间在节水方面取得了很大成效。5)由图3e可知,武威市灌溉需水量经历了先减少再增加又减少的过程,在2005—2012年效应最明显,效应值达到0.744。在各时段,种植规模效应均大于1,种植结构效应在各时段均小于1,气候变化效应在2000—2005年、2005—2012年2个时段作用明显,前者为促进灌溉需水量增长,后者抑制灌溉需水量增长,节水工程效应在2000—2005年作用相对明显,为抑制灌溉需水量的增长,在其他时段作用不明显,但在2005—2012年节水工程为促进灌溉需水量的增长,这一时段武威市节水工程整体上有微弱退化的趋势。

3 结论与建议

本文选取LMDI因素分解法2种模式分别对武威市灌溉需水量进行分解,得出如下结论:

1) 1995—2012 年, 武威市除民勤县, 其他地区种植规模变化不大, 但对种植结构进行了大规模调整, 减少了高耗水小麦种植面积, 增加耐旱的玉米、棉花等作物的种植面积, 且大部分作物种植结构效应远大于种植规模效应, 武威市种植结构不断趋于合理化。

2) 1995—2012 年, 总体上武威市除了民勤县灌溉需水量微弱增加外, 其他县区灌溉需水量均减少。种植规模效应促进灌溉需水量增加, 种植结构效应、节水工程效应抑制灌溉需水量增加。

3) 不同时段种植规模、种植结构、气候变化、节水工程在武威市不同区县对灌溉需水量的效应不同, 但在不同时段, 除在 2000—2005 年对凉州区灌溉需水量增加有微弱的促进作用外, 种植结构效应在武威市各区县均表现为抑制灌溉需水量增长的作用, 进一步说明种植结构的调整逐渐合理化, 有利于节约水资源。在对种植结构的调整过程中, 小麦种植面积减少是各区县灌溉需水量减少的主要驱动因素。在 2005—2012 年各区县总效应为灌溉需水量的减少, 但凉州区和民勤县节水工程效应却表现为微弱的促进灌溉需水量增加, 没有达到减少灌溉需水量的目的, 需要加强节水工程的管理与维护, 进一步改善灌水方式方法, 提高节水效益。

利用 LMDI 因素分解法对灌溉需水量进行分解, 分解结果完全, 并可提供多样的结果表现形式, 可以比较各驱动因素变化对区域灌溉需水量的影响, 从而对比评价种植规模效应、种植结构效应、气候变化效应、节水工程效应对灌溉需水量增量的影响。LMDI 因素分解法选取影响因子时可以同时考虑直接相关与间接相关的影响因子, 由于资料限制, 本文目前仅考虑了与灌溉需水量直接相关的影响因子, 在后续研究中还可考虑总人口、粮食总产量、人均粮食占有量等间接影响因子并结合参数敏感性分析对相关问题进行深入探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 雷宏军, 乔姗姗, 潘红卫, 等. 贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需求指数时空分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 115—121.
Lei Hongjun, Qiao Shanshan, Pan Hongwei, et al. Temporal and spatial distribution of agricultural irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 115—121. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2367—2377.
Hu Wei, Yan Changrong, Li Yingchun, et al. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirement in the north China plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2367—2377. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 98—104.
Liu Yuchun, Jiang Hong'an, Li Cundong, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 98—104. (in Chinese with English abstract)
- [4] 方文松, 刘荣花, 朱自玺, 等. 黄淮平原冬小麦灌溉需水量的影响因素与不同年型特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2177—2182.
Fang Wensong, Liu Ronghua, Zhu Zixi, et al. Irrigation water requirement by winter wheat in Huanghuai Plain Affecting factors and characteristics in different climatic years[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2177—2182. (in Chinese with English abstract)
- [5] Wang Xiaojun, Zhang Jianyun, Ali M, et al. Impact of climate change on regional irrigation water demand in Baojixia irrigation district of China[J]. Mitigation Adaptation Strategies for Global Change, 2016, 21: 233—247.
- [6] 王卫光, 彭世彰, 孙凤朝, 等. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 656—664.
Wang Weiguang, Peng Shizhang, Sun Fengchao, et al. Spatiotemporal variations of rice irrigation water requirements in the mid-lower reaches of Yangtze River under changing climate[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 656—664. (in Chinese with English abstract)
- [7] 高明杰, 罗其友. 水资源约束地区种植结构优化研究: 以华北地区为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 204—210.
Gao Mingjie, Luo Qiyu. Study on cropping structure optimization in region short of water: A case of North China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 204—210. (in Chinese with English abstract)
- [8] 周惠成, 彭慧, 张弛, 等. 基于水资源合理利用的多目标农作物种植结构调整与评价[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 45—49.
Zhou Huicheng, Peng Hui, Zhang Chi, et al. Optimization and evaluation of multi-objective crop pattern based on irrigation water resources allocation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [9] Ma Lin, Yang Yanmin, Yang Yonghui, et al. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2): 324—339.

- [10] 马黎华, 康绍忠, 粟晓玲, 等. 农作区净灌溉需水量模拟及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 11—18. Ma Lihua, Kang Shaozhong, Su Xiaoling, et al. Simulation and uncertainty analysis of net irrigation requirement in agricultural area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 11—18. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张翠芳, 牛海山. 民勤三项农业节水措施的相对潜力估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 7—12. Zhang Cuifang, Niu Haishang. Estimation of relative potential of three agricultural water-saving measures in Minqin Oasis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [12] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition [J]. Energy, 1998, 23(6): 489—495.
- [13] Zhang Wei, Li Ke, Zhou Dequn, et al. Decomposition of intensity of energy-related CO₂ emission in Chinese provinces using the LMDI method[J]. Energy Policy, 2016(92): 369—381.
- [14] Xu Yanjie, Huang Kai, Yu Yajuan, et al. Change in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: A logarithmic mean Divisia index decomposition analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2015(87): 180—187.
- [15] Chong Chinhao, Ma Linwei, Li Zheng, et al. Logarithmic mean Divisia index (LMDI) decomposition of coal consumption in China based on the energy allocation diagram of coal flows[J]. Energy, 2015(85): 366—378.
- [16] Tursun H, Li Zhenyang, Liu Rui, et al. Contribution weight of engineer technology on pollutant emission reduction based on IPAT and LMDI methods[J]. Clean Technology Environment Policy, 2015(17): 225—235.
- [17] Lei Hongjun, Xia Xunfeng, Li Changjia, et al. Decomposition analysis of wastewater pollutant discharges in industrial sectors of China (2001-2009) using the LMDI I Method[J]. Environmental Research and Public Health, 2012(9): 2226—2240.
- [18] 刘玉, 高秉博, 潘瑜春, 等. 基于 LMDI 模型的中国粮食产量变化及作物构成分解研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1709—1720. Liu Yu, Gao Bingbo, Pan Yuchun, et al. Investigation contribution factors to China's grain output increase based on LMDI model during the period 1980 to 2010[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(10): 1709—1720. (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang Yufang, Yang Degang, Tang Hong, et al. Analyses of changing process and influencing factors of water resources utilization in megalopolis of arid area[J]. Water Resources, 2015, 42(5): 712—720.
- [20] 张礼兵, 徐勇俊, 金菊良, 等. 安徽省工业用水量变化影响因素分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 837—843. Zhang Libing, Xu Yongjun, Jin Juliang, et al. Analysis of influence factors of regional industry water use in Anhui province[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 837—843. (in Chinese with English abstract)
- [21] 孙才志, 谢巍, 邹玮. 中国水资源利用效率驱动效应测度及空间驱动类型分析[J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1213—1220. Sun Caizhi, Xie Wei, Zou Wei. Contribution ratio measurement of water use efficiency driving effects and spatial driving type in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(10): 1213—1220. (in Chinese with English abstract)
- [22] Zhao Chunfu, Chen Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48: 12723—12731.
- [23] 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [24] 牛纪苹. 气候变化对内陆河流域农业灌溉需水的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. Niu Jiping. Impact of Climate Change on Agricultural Irrigation Water Requirement in Continental River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [25] Ang B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. Energy Policy, 2015, 86: 233—238.
- [26] 甘肃省水利厅. 甘肃省水资源公报[M]. 兰州: 甘肃省水利厅, 2014.
- [27] 国家统计局武威调查队. 武威统计年鉴[M]. 武威: 武威市统计局, 2015.
- [28] 佟玲. 西北干旱内陆区石羊河流域农业耗水对变化环境响应的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. Tong Ling. Impacts of Environment Change on Agricultural Water Consumption in Shiyang River Basin in Arid Region of Northwest China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [29] 吕廷波. 西北干旱内陆区石羊河流域灌溉水利用率估算与评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2007. Lü Tingbo. Estimation and Evaluation on Irrigation Water Use Efficiency of the Shiyang River Basin in Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [30] 顾贺. 甘肃农业灌溉用水有效利用系数测算及阈值分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. Gu He. Coefficient and Threshold Calculation Analysis of Gansu Agricultural Irrigation Water Use[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese with English abstract)

Decomposition of influencing factors on irrigation water requirement based on LMDI method

Xie Juan, Su Xiaoling*

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education,
College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to study the driving factors of irrigation water requirement and find the effective measures for relieving the sharp contradiction between the supply and demand of agriculture water resources, in this paper the factors decomposition model for irrigation water requirement was established based on the extended Kaya equation. The logarithmic mean Divisia index (LMDI) decomposition method was used to quantitatively analyze the driving factors for changes in irrigation water requirement. The change of irrigation water requirement was decomposed into 4 driving factors including planting scale effect, planting structure effect, climate change and water saving engineering effect. The irrigating quota of crop and irrigation water utilization coefficient reflected the climate change and water saving engineering, respectively. Two different decomposition methods of LMDI, addition decomposition and multiplication decomposition, were applied to calculate the effect value of the 4 driving factors for irrigation water requirement change. The irrigation water requirement from 1995 to 2012 in Wuwei city, Gansu Province was taken as an example. The effect values of 4 driving factors were calculated in different periods from 1995 to 2012. The results showed that during 1995-2012, the planting structure in Wuwei city was adjusted by reducing the planting area of wheat and increasing planting area of maize and cotton consuming less irrigation water than wheat. The amount of irrigation water requirement in 2012 was decreased by $5.023 \times 10^8 \text{ m}^3$ in Wuwei city than that in 1995 including an increase of $2.435 \times 10^8 \text{ m}^3$ caused by the planting scale effect, and the decrease of $3.994 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.286 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.178 \times 10^8 \text{ m}^3$ for the planting structure effect, the climate change effect, and the water saving engineering effect, respectively. The adjustment of planting structure was the most important factor for the decrease of the irrigation water requirement. From the effect value of different crops in the counties of Wuwei city, each crop had different effect on the change in irrigation water requirement. Wheat had the negative impact on the irrigation water requirement change and played a prominent role in decreasing the irrigation water requirement during 1995 to 2012. Among the 4 driving factors for the same crop, for most crops the planting structure effect was stronger than the others in all the regions. In addition, 4 driving factors in different periods played different role in changing irrigation water requirement in the counties of Wuwei city. However, the planting structure always had the inhibitory effect on increasing irrigation water requirement obviously in all the regions and periods except for Liangzhou in 2000-2005. Water saving engineering had the positive effect on increasing irrigation water requirement in Wuwei city, Liangzhou county and Minqin county during 2005-2012. The main reason was a decrease in irrigation water utilization coefficient. Therefore, improving the efficiency of irrigation water utilization and controlling agricultural development scale are effective measures for saving irrigation water in Wuwei city.

Keywords: irrigation; climate changes; evapotranspiration; irrigation water requirement; factors decomposition; LMDI; Wuwei City