

基于 STIRPAT 扩展模型平塘县农业水足迹 变化及驱动机制研究

易武英^{1,2}, 苏维词^{2,3}, 喻理飞¹, 赵卫权², 邢丹⁴

(1. 贵州大学 生命科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州科学院 贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001;
3. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 4. 贵州省农业科学院蚕业研究所, 贵州 贵阳 550006)

摘要: 平塘县水资源短缺问题突出, 农业生产使得水资源匮乏日益加剧, 因此, 该地区急需明晰农业水资源利用关键影响因素, 以达到构建低水耗高效农业生产模式, 提高水资源利用效率目标。利用水足迹核算模型, 定量测算 2001–2015 年平塘县农业用水状况, 在经典 IPAT 环境压力等式基础上, 从人口、经济、技术、城镇化、膳食结构、气候 6 个方面, 构建水足迹 STIRPAT 扩展模型, 剖析平塘县农业水足迹变化主要驱动因素。结果显示: 平塘县农业水足迹从 2001 年 $6.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2015 年 $8.60 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增加了 42.86%, 绿水、蓝水的增加主要由于农业产业结构调整、种植技术改进、作物新品种推广等, 灰水水足迹快速增长主要由于化肥大量使用; 平塘县农业水足迹驱动因子贡献率由大到小排序为: 膳食结构 > 降水量 > 人口 > 经济 > 技术 > 城镇化, 上述驱动因子每变化 1%, 分别导致农业水足迹总量变化 -0.1071%、0.09393%、0.0684%、0.0585%、0.0581%、0.0453%。平塘县属于典型喀斯特峰丛洼地区, 由于特殊“二元”结构特征, 地表调蓄功能极弱, 农药化肥大量使用, 导致灰水对农业用水增长率的贡献率较大, 而经济欠发达, 生活水平低, 以植物性食物为主的膳食结构, 在一定程度节省农业用水。

关键词: 农业水足迹; 驱动力; STIRPAT 扩展模型; 喀斯特峰丛洼地

中图分类号: F323.213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0243-06

Study on the change of agricultural water footprint and driving force mechanism based on STIRPAT extended model in Pingtang County

YI Wuying^{1,2}, SU Weici^{2,3}, YU Lifei¹, ZHAO Wei-quan², XING Dan⁴

(1. College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China; 3. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 4. Research Institute of Sericulture, Guizhou Academy of Agricultural Science, Guiyang 550006, China)

Abstract: Pingtang County is facing severe water shortage and the agricultural water use makes the situation worse; therefore, there is an urgent need to clarify the key factors affecting the utilization of agricultural water resources in this area, to construct high efficiency agricultural production model, and to improve water resources use efficiency. Using the water footprint research model, quantitative estimation of agricultural water use in Pingtang County from 2001 to 2015 was carried out, and the STIRPAT extension model of water footprint variation was constructed considering six factors including population, economy, technology, urbanization, dietary structure and climate and based on the classical IPAT environmental pressure equation. The main driving factors of agricultural water footprint change in Pingtang County was analyzed. The results show that: the water footprint of Pingtang County increased by 42.86% from $6.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2001 to $8.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2015. The increasing footprint of green water and blue water was due to the adjustment of agricultural industrial structure, the improvement of planting technology, the ex-

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-06-21

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合 SY 字[2015]3018); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2016]1528-3); 国家自然科学基金项目(31460225)

作者简介: 易武英(1987-), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事喀斯特生态环境与可持续发展研究。

tension of new crop varieties. The rapid growth of ash water footprint was mainly due to the heavy use of chemical fertilizers; The driving contribution of the driving factor of agricultural water footprint change in Pingtang County was ranked from large to small as follows: dietary structure > precipitation > population > economy > Technology > urbanization, and every 1% change in the above driving factors will cause the change of the total agricultural water footprint - 0.1071%, 0.09393%, 0.0684%, 0.0585%, 0.0581%, and 0.0453%, respectively. Pingtang County belongs to a typical karst peak cluster depression, and surface storage function is very weak, due to the special surface and underground "dual" structural characteristics. The contribution rate of grey water to agricultural water use growth rate is large, due to heavy use of pesticides and fertilizers. However, the economy is underdeveloped, with low living standard, the dietary structure are mainly vegetative food, which saves agricultural water to a certain extent.

Key words: agricultural water footprint; driving force; STIRPAT extended model; karst peak cluster depression

1 研究背景

人类生活生产活动驱动水资源的社会代谢过程导致了水量减少和水质污染^[1],目前水危机已成为全球性问题^[2],在中国尤其突出^[3-4]。中国是农业大国,农业生产用水方式粗放^[5],漫灌、沟灌、畦灌等极其普遍,水资源利用效率低,水资源短缺问题严峻。喀斯特地区土层薄,土岩黏着力弱,岩层原次生孔(裂)广泛发育,地表地下连通性强,不合理开发利用活动极易引发水土流失、岩石裸露及石漠化的发生,从而导致地表水源涵养调蓄功能衰退,甚至丧失。石漠化是先天脆弱环境与后天人为干扰破坏综合作用的结果,西南喀斯特地区降水资源丰富(年降水量 1 000 mm 以上),但地表可利用水资源极其匮乏,喀斯特峰丛洼地是一特殊喀斯特地貌类型,相对封闭且广泛分布,其入地地域系统复杂,粗放型农业生产方式导致喀斯特峰丛洼地水资源短缺问题日益严峻,生产用水与生态环境用水矛盾突出,严重制约了当地社会经济发展及生态建设进程的推进^[6-7],因此,喀斯特峰丛洼地水资源问题受到政府、学界、公众的广泛关注,开展喀斯特地区农业用水相关研究具有重要的现实意义。

农业水足迹受生产区位、生产方式、气候条件^[8-9]、农业人口特征(民族构成、生活习惯、农户生计方式等)^[10]、农业生产技术水平^[11]、作物品种^[12]、经济水平、耕作模式、灌溉方式、土壤特征、水系特征等众多因素影响。农业是用水大户,对于地表可利用水资源极其匮乏的喀斯特地区,明晰其农业水足迹主要影响因素,可为该地区水资源管理提供参考资料。目前水足迹驱动机制研究方法主要有

系统动力学、灰色关联度法^[13]、生命周期评价法^[14-15]、多区域投入产出法^[16]、STIRPAT^[17]等,而 STIRPAT 主要用于能源足迹、碳足迹、生态足迹驱动力研究,对于水足迹研究较少。目前关于水足迹驱动力研究主要集中于人口、经济、技术等方面,而较少考虑城镇化、膳食结构、气候对其影响。本文以平塘县为例,从人口、经济、技术、城镇化、膳食结构、气候 6 个方面,构建水足迹 STIRPAT 扩展模型,识别平塘县水足迹变化主要驱动因素,为该地区水资源科学管理提供参考依据。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

平塘县位于贵州省南部,地处东经 106°40' ~ 107°27'、北纬 25°30' ~ 26°07',属于国家级贫困农业县,国土总面积 2 805 km²,2015 年总人口 32.95 × 10⁴ 人,农业人口占总人口 77.62%,人地水矛盾尖锐。属于中亚热带季风湿润气候区,气候条件优越,而生产方式落后,以传统小农经营为主,水土资源时空匹配状况极差,土层薄,且分布不连续,坡地多,平地少,抗旱能力极弱,作物受干旱胁迫频繁,部分地区人畜饮水困难。平塘县作物以水稻、玉米、薯类为主,不合理种植模式导致水资源消耗量大,随着城镇化进程的推进和人口的增长,水资源供需矛盾日益突出,生产用水挤占生态用水现象严重,当地可持续发展受到严重阻碍。

2.2 数据来源

以 2001 - 2015 年《平塘县统计年鉴》、《2001 年黔南州水资源公报》、《平塘县国民经济与社会发展统计公报》为主要数据源,结合实地调研数据,部分指标缺失利用相近指标替代。为避免历年 GDP 产

值受价格因素的影响,以 2001 年为基期年,运用平减指数法换算成可比价格后核算 GDP 年增长率。

3 研究方法

3.1 农业水足迹计算

农业用水量计算,包括作物产品生产用水量(蓝水、绿水、灰水)和动物产品生产用水量,农业用水量计算某一区域农业产品产量与单位产品虚拟水量相乘求各获得。其公式表示为:

$$AWU = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot VMC_i)$$

(1)

式中:AWU 为农业用水总量; P_i 为第 i 种农业产品的产量; VMC_i 为第 i 种农业产品的单位产品虚拟水量。

3.2 STIRPAT 模型及其扩展

STIRPAT 模型源于经典 IPAT 环境压力等式: $I = PAT$,最早于 20 世纪 70 年代由美国生态学家埃里奇(Ehrlich)和康默纳(Commoner)提出。York 等在此基础上建立了 STIRPAT 模型,其基本形式如下:

$$I = a \cdot P^b \cdot A^c \cdot T^d \cdot e$$

(2)

此模型将人口(P)、经济(A)、技术(T)作为环境压力(I)的驱动因素。

本文结合水足迹研究特征,对 STIRPAT 模型进行改进,增加城镇化、膳食结构、气象 3 个因素,由于城镇化对农产品需求量、需求结构均具有重要影响;随着生活水平的改善,消费结构将产生相应变化(其中深加工高虚拟水含量产品所占比重提升),而膳食结构特征直接影响虚拟水消耗量。平塘县经济欠发达,农业生产条件恶劣,望天地所占比重较大,因此,气候条件对农业生产起着重要作用。经改进后 STIRPAT 模型如下所示:

$$I = a \cdot P^b \cdot A^c \cdot T^d \cdot U^e \cdot D^f \cdot M^g \cdot h$$

(3)

式中: P 为人口; A 为经济; T 为技术; U 为城镇化; D 为膳食结构; M 为气象; h 为模型误差项。

根据 STIRPAT 模型构建的平塘县农业水足迹变化驱动研究指标体系如表 1 所示,表 2 为各指标的观测值。

通过等式两边取对数处理,既可降低异方差,又能获得被解释变量对解释变量的弹性,公式(3)取对数后,其基本形式为:

$$\ln(I) = \ln a + b \ln(P) + c \ln(A) + d \ln(T) + e \ln(U) + f \ln(D) + g \ln(M) + \ln h$$

(4)

式中: $\ln(I)$ 为因变量; $\ln(P)$ 、 $\ln(A)$ 、 $\ln(T)$ 、 $\ln(U)$ 、 $\ln(D)$ 、 $\ln(M)$ 为自变量; $\ln a$ 为常数项, $\ln h$ 为误差项

进行多元线性拟合确定模型参数。其中 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 为弹性系数,表示 P 、 A 、 T 、 U 、 D 、 M 每变化 1% 分别引起 I 的 $b\%$ 、 $c\%$ 、 $d\%$ 、 $e\%$ 、 $f\%$ 、 $g\%$ 变量。

表 1 平塘县农业水足迹变化驱动因子

因子	指标	量纲
人口因子 P	总人口(P_1)	
	人口密度(P_2)	人/km ²
经济因子 A	人均 GDP(A_1)	元
	国内生产总值(A_2)	10 ⁴ 元
	农民人均纯收入(A_3)	元
	农业机械总动力(T_1)	10 ⁴ kW
技术因子 T	人均用电量(T_2)	10 ⁴ (kW · h ⁻¹)
	城镇化因子 U	
膳食结构因子 D	城镇化率(U_1)	%
	人均粮食占有量(D_1)	kg/a
	人均蔬菜(D_2)	kg/a
	人均水果(D_3)	kg/a
	人均猪肉(D_4)	kg/a
	人均牛肉(D_5)	kg/a
	人均马肉(D_6)	kg/a
	人均羊肉(D_7)	kg/a
	人均家禽(D_8)	kg/a
	人均蛋类(D_9)	kg/a
气象因子 M	人均鱼类(D_{10})	kg/a
	年降水量(M_1)	mm

3.3 偏相关及因子主成分分析

偏相关分析利用统计分析软件 SPSS9.0 中偏相关分析对影响水足迹相关指标时间序列数据进行偏相关分析。

因子主成分分析利用 SPSS19.0 软件,进行 2001-2015 年平塘县农业水足迹变化影响因子主成分分析。

4 结果分析

4.1 平塘县农业水足迹分析

表 3 为 2001-2015 年平塘县农业水足迹分析结果。由表 3 可知,2001-2015 年平塘县农业总用水量从 2001 年 $6.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2015 年 $8.60 \times 10^8 \text{ m}^3$,绿水、蓝水、灰水、禽畜用水总体上呈增加变化趋势,分别增加了 $0.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3$,按增加量大小排序为:灰水 > 绿水 > 蓝水 > 禽畜用水,灰水增长速度最快,绿水、蓝水增长速度相近,禽畜用水基本不变,因此,

灰水对农业用水增长率的贡献率最大。灰水快速增长主要由于农药化肥的大量使用,平塘县氮肥使用量(折纯后)从 2001 年 3 780.38 t 上升到 2015 年 6 067.59 t。在播种面积变化幅度不大前提下,由于

农作物品种改良、农业产业结构调整、种植技术改进以及作物新品种推广,使单产增加,绿水、蓝水水足迹有所增长(如表 3 所示)。

表 2 平塘县农业水足迹增长驱动因子观测值

年份	P_1	P_2	A_1	A_3	A_3	T_1	T_2	U_1	D_1	D_2
2001	294300	104	1339	39142	1137	5.60	22.4	4.42	308.0	162.4
2002	301353	104	1526	45672	1213	7.10	21.8	4.54	262.0	184.6
2003	303336	107	1699	51303	1338	7.50	22.0	4.76	306.0	194.0
2004	305533	108	2054	62600	1491	7.60	22.5	5.33	318.0	205.7
2005	297891	108	2355	72391	1650	8.40	23.1	5.75	332.0	229.5
2006	302075	107	2652	82380	1759	10.30	23.1	5.88	744.0	242.4
2007	304998	108	3408	100393	2160	11.90	23.2	6.14	764.0	223.6
2008	309700	109	4386	125386	1126	12.30	24.2	6.36	785.0	242.3
2009	312344	110	4242	121365	2924	12.45	25.1	6.46	824.5	260.0
2010	319623	113	5867	150723	3428	12.79	25.8	6.40	819.0	245.1
2011	322634	114	8051	182818	4210	14.50	30.3	6.53	525.7	241.3
2012	322875	114	11653	266435	4955	15.26	38.5	7.06	656.5	292.5
2013	322908	131	13573	318256	5728	10.55	41.1	7.40	645.8	320.7
2014	323782	132	17760	424100	6666	26.50	44.1	7.67	673.5	371.6
2015	329483	134	19885	475500	7393	26.70	43.3	22.38	668.6	343.9
年份	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	M_1	
2001	6.1	77.8	28.1	0.8	0.7	4.7	0.3	1.7	1028.9	
2002	8.0	79.1	28.5	0.7	0.7	4.8	3.4	1.8	1395.8	
2003	10.8	81.2	33.9	0.6	1.3	5.0	3.4	1.8	1001.2	
2004	11.3	84.8	35.3	0.6	1.4	5.3	3.5	1.8	1158.8	
2005	13.0	103.8	39.0	0.7	1.5	5.7	3.9	2.2	1010.9	
2006	13.1	107.6	40.2	0.7	1.5	5.9	4.1	2.6	1151.9	
2007	16.9	113.9	43.4	0.4	1.6	6.2	4.3	2.5	1190.9	
2008	17.5	68.6	22.7	1.5	0.7	4.7	2.9	2.8	1098.8	
2009	18.2	72.6	23.6	3.4	0.7	5.0	3.0	2.9	1009.6	
2010	19.1	73.2	24.1	3.2	0.7	5.0	3.2	3.1	1271.4	
2011	20.5	73.1	24.6	3.0	0.7	4.9	3.3	3.7	1006.5	
2012	26.3	77.9	28.6	3.0	1.2	5.2	3.7	4.8	985.6	
2013	29.7	81.8	32.5	2.9	1.3	5.1	3.9	5.5	1154.0	
2014	28.0	78.9	27.8	3.4	1.0	5.3	4.0	4.8	1447.9	
2015	29.2	77.3	27.0	3.6	1.0	5.2	4.0	5.0	1468.7	

4.2 偏相关分析

以人口因子 P 、经济因子 A 、技术因子 T 、城镇化因子 U 、膳食结构因子 D 、气象因子 M 各因子所涵盖

的指标为解译变量,以 I 为因子变量,利用 SPSS22.0 统计软件进行偏相关分析,结果显示上述指标对研究区水足迹均具有重要影响。

表 3 2001 – 2015 年平塘县农业水足迹 10^8 m^3

年份	绿水	蓝水	灰水	禽畜用水	农业总用水量
2001	0.98	0.92	3.77	0.34	6.02
2002	0.95	0.90	8.18	0.33	10.36
2003	0.98	0.92	3.85	0.36	6.12
2004	1.15	1.09	4.08	0.41	6.72
2005	1.23	1.16	3.66	0.47	6.52
2006	1.43	1.34	4.33	0.49	7.58
2007	1.37	1.29	3.66	0.53	6.84
2008	1.42	1.33	3.66	0.32	6.73
2009	1.50	1.41	4.83	0.35	8.08
2010	1.50	1.41	5.04	0.36	8.30
2011	1.21	1.14	5.35	0.37	8.07
2012	1.25	1.18	5.68	0.40	8.51
2013	1.26	1.18	5.99	0.43	8.86
2014	1.47	1.38	5.21	0.41	8.47
2015	1.50	1.42	5.27	0.41	8.60

4.3 因子主成分分析

表 4 为主成分特征值与变异数统计,由表 4 可知,可提取 3 个主成分(即综合变量),分别以 FAC_1 、 FAC_2 、 FAC_3 表示,3 个综合变量可解释因变量 87.652%。且 t 检验 Sig(单侧)值小于 0.01,拟合程度较好。表 5 为旋转后的因子载荷矩阵,由表 5 可得综合变量 FAC_1 、 FAC_2 、 FAC_3 与因变量的关系,如下:

$$FAC_1 = 0.959P_1 + 0.911P_2 + 0.991A_1 + 0.993A_2 + 0.941A_3 + 0.920T_1 + 0.929T_2 + 0.804U_1 + 0.673D_1 + 0.953D_2 + 0.949D_3 - 0.328D_4 - 0.387D_5 + 0.869D_6 - 0.038D_7 + 0.001D_8 + 0.438D_9 + 0.966D_{10} + 0.402M_1 \quad (5)$$

$$FAC_2 = -0.123P_1 + 0.077P_2 + 0.023A_1 + 0.059A_2 + 0.086A_3 + 0.087T_1 + 0.018T_2 + 0.112U_1 + 0.113D_1 + 0.196D_2 + 0.173D_3 + 0.910D_4 + 0.894D_5 - 0.422D_6 + 0.929D_7 + 0.956D_8 + 0.548D_9 + 0.040D_{10} + 0.096M_1 \quad (6)$$

$$FAC_3 = -0.038P_1 + 0.265P_2 - 0.031A_1 - 0.023A_2 + 0.002A_3 + 0.044T_1 + 0.119T_2 + 0.268U_1 - 0.434D_1 - 0.020D_2 - 0.216D_3 + 0.007D_4 + 0.075D_5 - 0.163D_6 - 0.028D_7 - 0.125D_8 - 0.069D_9 - 0.128D_{10} + 0.801M_1 \quad (7)$$

根据公式(5)~(7),以 W 为被解释变量,以 FAC_1 、 FAC_2 、 FAC_3 为解释变量,利用 SPSS22.0 软件中最小二

乘法(OLS)进行回归拟合,Sig 值小于 0.01,表明模型拟合较好。表 6 为回归拟合模型参数。

表 4 主成分特征值与变异数统计

元 件	起始特征值			提取平方和载入		
	总计	变异的%	累加%	总计	变异的%	累加%
1	11.520	60.633	60.633	11.520	60.633	60.633
2	4.026	21.189	81.822	4.026	21.189	81.822
3	1.108	5.830	87.652	1.108	5.830	87.652
4	0.881	4.637	92.289			
5	0.606	3.190	95.479			
6	0.323	1.703	97.181			
7	0.173	0.912	98.093			
8	0.133	0.699	98.792			
9	0.097	0.513	99.305			
10	0.072	0.381	99.686			
11	0.037	0.197	99.883			
12	0.014	0.075	99.958			
13	0.006	0.034	99.992			
14	0.002	0.008	100.00			
15	6.856×10^{-16}	3.608×10^{-15}	100.00			
16	2.651×10^{-16}	1.395×10^{-15}	100.00			
17	-6.586×10^{-17}	-3.466×10^{-16}	100.00			
18	-1.078×10^{-16}	-5.673×10^{-16}	100.00			
19	-7.394×10^{-16}	-3.892×10^{-15}	100.00			

表 5 旋转后的因子载荷矩阵

指标	主成分		
	FAC_1	FAC_2	FAC_3
总人口	0.959	-0.123	-0.038
人口密度	0.911	0.077	0.265
人均 GDP	0.991	0.023	-0.031
国内生产总值	0.993	0.059	-0.023
农民人均纯收入	0.941	0.086	0.002
农业机械总动力	0.920	0.087	0.044
人均用电量	0.929	0.018	0.119
城镇化率	0.804	0.112	0.268
人均粮食占有量	0.673	0.113	-0.434
人均蔬菜	0.953	0.196	-0.020
人均水果	0.949	0.173	-0.216
人均猪肉	-0.328	0.910	0.007
人均牛肉	-0.387	0.894	0.075
人均羊肉	0.869	-0.422	-0.163
人均马肉	-0.038	0.929	-0.028
人均家禽	0.001	0.956	-0.125
人均蛋类	0.438	0.548	-0.069
人均鱼类	0.966	0.040	-0.128
年降水量	0.402	0.096	0.801

表6 回归模型参数

标量	回归系数	标准误差	Beta	T
常数	18.880	1.120		16.850
变量1	0.023	0.011	0.768	2.146
变量2	-0.019	0.035	-0.129	-0.531
变量3	0.108	0.143	0.269	0.757

由表6得,综合变量 FAC_1 、 FAC_2 、 FAC_3 与 I 的关系式:

$$\ln I = 18.88 + 0.023FAC_1 - 0.019FAC_2 + 0.108FAC_3 \quad (8)$$

将公式(5)~(7)代入公式(8)中可得:

$$\begin{aligned} \ln I = & 18.88 + 0.02029P_1 + 0.04811P_2 + 0.019008A_1 + \\ & 0.019234A_2 + 0.020225A_3 + 0.024259T_1 + \\ & 0.033877T_2 + 0.045308U_1 - 0.03354D_1 + \\ & 0.016035D_2 - 0.004788D_3 - 0.024078D_4 - \\ & 0.017787D_5 + 0.010401D_6 - 0.021549D_7 - \\ & 0.031641D_8 - 0.00779D_9 + 0.007634D_{10} + \\ & 0.09393M_1 \end{aligned} \quad (9)$$

由公式(9)可得2002-2015年平塘县农业水足迹的驱动因子模型为:

$$I = P^{0.0684} A^{0.0585} T^{0.0581} U^{0.0453} D^{-0.1071} M^{0.09393} \quad (10)$$

由式(10)可知,2002-2015年平塘县农业水足迹变化的人口、经济、技术、城镇化、膳食结构、气象驱动因子弹性系数分别为0.0684、0.0585、0.0581、0.0453、-0.1071、0.09393,表示当人口每增加1%时,农业水足迹总量将增加0.0684%;当经济每增加1%时,农业水足迹总量将增加0.0585%;当农业技术每增加1%时,农业水足迹总量将增加0.0581%;当城镇化每增加1%时,农业水足迹总量增加0.0453%;当膳食结构每变化1%时,农业水足迹总量将变化-0.1071%;当降水量每增加1%时,农业水足迹总量将增加0.09393%。此外,人口、经济、技术、城镇化、气象与农业水足迹总量增长均呈正相关,且其影响强度由大到小排序为:气象>人口>经济>技术>城镇化。平塘县喀斯特地貌广泛发育,灌溉条件差,望天地较多,农业生产受气象影响较大,而膳食结构与农业水足迹总量增长呈负相关,平塘县经济欠发达,生活水平低,膳食结构以植物性食物为主,在一定程度减少了农业用水。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文运用STIRPAT扩展模型,剖析平塘县农业

水足迹变化驱动机制,识别农业水足迹变化关键影响因素,根据模型分析结果可知:

(1)平塘县农业水足迹从2001年 $6.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到2015年 $8.60 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加了42.86%,农业产业结构调整、种植技术改进、作物新品种推广,使绿水、蓝水有所增加,灰水快速增长主要由于化肥的大量使用。

(2)平塘县农业水足迹6个驱动因子(膳食结构、降水量、人口、经济、技术、城镇化),其每变化1%,分别导致农业水足迹总量变化-0.1071%、0.09393%、0.0684%、0.0585%、0.0581%、0.0453%,而膳食结构是平塘县农业水足迹变化主要影响因素,由于平塘县整体经济欠发达,生活水平低,人口食物消费结构中植物性食物所占比重较高。

5.2 讨论

平塘县喀斯特峰丛洼地广泛发育,极弱地表调蓄功能将成为限制平塘县水资源利用效率高的瓶颈所在。研究只关注农产品水足迹,未涵盖二、三产业水足迹及生态需水量研究,主要由于相关工业、贸易、环境等方面数据不易获取。此外,径流与土壤水存在动态转化(上坡径流成为中、下坡土壤水重要补给源),蓝水与绿水难以严格区分,容易造成重复计算。

在经济发达的非喀斯特地区,随着生活水平提高,食物消费结构变化显著(随着生活水平的提高,食物中深加工高虚拟水含量产品所占比重提升),将导致农业水足迹增加。但在经济欠发达的喀斯特峰丛洼地(以平塘县为例),居民膳食以植物性食物农产品为主,膳食结构中肉类所占比重不大,在某种意义上,该结构是一种节水型的消费方式。

参考文献:

- [1] 李冰瑶,陈星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 104-108.
- [2] YANG Zhongwen, LIU Hongli, XU Xinyi, et al. Applying the water footprint and dynamic structural decomposition analysis on the growing water use in China during 1997-2007[J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 634-643.
- [3] 孙艳芝,沈镭. 关于我国四大足迹理论变化研究的文献计量分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1463-1473.
- [4] 李泽红,董锁成,李宇,等. 武威绿洲农业水足迹变化及其驱动机制研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(3): 410-416.

(下转第254页)

- 玉米需水规律试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Z1): 31-34.
- [15] 蔡焕杰, 康绍忠. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24-27.
- [16] EL-HENDAWY S E, EL-LATTIEF E A A, AHMED M S, et al. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 836-844.
- [17] 江水艳. 浅谈阿勒泰地区节水灌溉可持续发展[J]. 新疆水利, 2009(6): 17-18+23.
- [18] 李余良, 郑锦荣, 胡建广, 等. 水分胁迫对甜玉米主要农艺性状及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 217-221.
- [19] 王小燕, 褚鹏飞, 于振文. 水氮互作对小麦土壤硝态氮运移及水、氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 992-1002.
- [20] 刘浩, 孙景生, 张寄阳, 等. 耕作方式和水分处理对棉花生产及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 164-168.
- [21] 宫亮, 孙文涛, 隗英华, 等. 补充灌溉对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2017(1): 9-11+15.
- [22] 柴孟竹, 李钊, 秦东玲, 等. 乙烯利对玉米茎秆抗倒伏性的调控效应[J]. 玉米科学, 2017, 25(6): 63-72.
- [23] 李凯, 张晓祥, 管中荣, 等. 玉米株高和穗位高的全基因组关联分析[J]. 玉米科学, 2017, 25(6): 1-7.
- [24] 张淑杰, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 水分胁迫对玉米生长发育及产量形成的影响研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 68-72.
- [25] 黄晓俊, 于飞, 敖芹. 干旱对玉米生长及产量影响的试验研究[J]. 贵州气象, 2012, 36(6): 25-28.

(上接第 248 页)

- [5] 王旭, 高翔, 曹蕾, 等. 水足迹视角下的宁夏中卫市农业水资源利用评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 619-624.
- [6] 代稳, 张美竹, 秦趣, 等. 六盘水市水资源安全的水足迹分析[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(5): 38-42.
- [7] 徐梦珂, 陈星, 王好芳, 等. 青岛市水生态文明建设评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 109-114.
- [8] 孙世坤, 刘文艳, 刘静, 等. 河套灌区春小麦生产水足迹影响因子敏感性贡献率分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2751-2762.
- [9] 赵慧, 潘志华, 韩国琳, 等. 气候变化背景下武川主要作物生产水足迹变化分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 406-416.
- [10] 张丽琼, 赵雪雁, 郭芳, 等. 黑河中游不同生计方式农户的水足迹分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 356-362.
- [11] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 吉林省西部玉米生产水足迹研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 1020-1025.
- [12] 段青松, 何丙辉, 字淑慧, 等. 两种玉米的生产水足迹研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 78-82.
- [13] 刘莉, 邓欧平, 邓良基, 等. 2003-2011 年四川省各市(州)农业水足迹时空变化与驱动力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1133-1141.
- [14] 徐长春, 黄晶, Ridoutt B G, 等. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 873-880.
- [15] 胡婷婷, 黄凯, 金竹静, 等. 滇池流域主要农业产品水足迹空间格局及其环境影响测度[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3719-3729.
- [16] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较——基于“总量-相关指标-结构”分析框架[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 76-87.
- [17] ZHAO Chunfu, CHEN Bin, HAYAT T, et al. Driving force analysis of water footprint change based on extended STIRPAT model: Evidence from the Chinese agricultural sector[J]. Ecological Indicators, 2014, 47: 43-49.