

中国粮食生产的水资源利用特征评价

刘 聪

(浙江大学 管理学院, 浙江 杭州 310058)



摘 要 基于标准彭曼公式,利用 CROPWAT 软件测量了中国 31 个省区粮食作物的绿水、蓝水及灰水足迹,并在此基础上对粮食生产的耗水量、生态修复需水量以及水资源利用效率进行了评价。结果显示:小麦、玉米和水稻三种粮食作物对水资源的消耗数量和类型存在较大地区差异,河南、山东等省份具有较高的水资源使用量,而浙江、福建等省份用于粮食生产的水资源数量相对较少,江苏、浙江等降雨量充沛的省份具有相对较高的绿水消耗比重,而陕西、甘肃等水资源稀缺省份具有较高的蓝水消耗比重;1998—2013 年三种粮食作物的灰水足迹总量均在总体上呈现出上升趋势,其中水稻的灰水足迹总量相对最高,灰水足迹总量较大的地区主要集中于东北、华北、华东、华中等区域,表明这些地区对生态修复水量的需求较大;我国粮食作物的水足迹强度在总体上呈现出下降趋势,表明水资源利用效率得到了提高,空间分析结果显示水足迹强度具有显著的全局与局域空间正相关特征,其中相比于西北和华北地区,西南、华东和华南地区具有相对较低的水足迹强度,意味着这些地区具有较高的水资源利用效率。

关键词 水足迹; 粮食作物; 耗水量; 生态修复需水量; 水资源利用效率

中图分类号: F323.213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-3456(2017)04-0022-08

DOI 编码: 10.13300/j.cnki.hnwkxb.2017.04.004

水足迹概念由 Hoekstra 于 2002 年提出,它弥补了以往水资源核算方法的不足,为评价粮食生产的水资源利用状况提供了新的思路。与传统水资源评价体系不同,粮食作物水足迹包含绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹三种,分别是粮食作物生产过程中所蒸腾的存在于土壤中的雨水资源量,粮食生产过程中所消耗的地表与地下水的总量,以及以现有水质标准为基准,将粮食生产过程中所产生的污染稀释至符合规定的淡水标准所需要的水量^[1-2]。其中灰水足迹可以通过水量与水质的关系直观反映出污染对水资源用量的影响,由此体现出粮食生产对环境的影响。水足迹理论克服了以往在农业水资源评价中主要考虑灌溉用水的缺陷,而是将实物形态的灌溉水与虚拟形态的土壤水以及污染稀释量联系起来,从而可以更加真实地反映农业生产对水资源的需求与占用情况^[3]。

以往文献从不同角度对水资源的利用状况进行了评价^[4-7],但却较少从水足迹视角出发进行研究。在国外,Hoekstra 等最早定量核算了全球水足迹,并据此分析了 1995—1999 各国的虚拟水贸易平衡情况^[8];Kampman 等比较了水足迹与实际可用水资源量之间的关系,并据此确定水资源匮乏的重点区域^[9]。国内也有少量学者对水足迹进行了研究,孙才志等利用水足迹强度指标评价了中国各省区的水资源利用效率,并利用基尼系数和锡尔指数得出了水足迹强度的时空差异分布特征,发现水足迹强度的地区差异较为明显^[10];刘梅等通过测算水足迹相关指数,对水资源的匮乏度、自给率等特征进行了评价,并根据聚类分析原理发现河北省各行政区域的水足迹特征存在显著的时空差异^[11];操信春等从区域层面测量了粮食生产水足迹,并建立了粮食生产用水水平综合评价体系,在考虑绿水

收稿日期:2017-02-21

基金项目:浙江省自然科学基金重点项目“外部冲击对中国粮食供求的影响研究:基于全球农业市场分析模型”(LZ13G030002)。

作者简介:刘 聪(1993-),女,博士研究生;研究方向:农业经济分析、农业环境资源经济学。

和蓝水足迹的前提下评价了粮食生产与水资源利用之间的关系^[12]。值得注意的是,以往研究具有很好的借鉴意义,但仍存在明显的不足:首先,以往文献在开展水足迹视角的用水评价时,大多以工业、农业或生活用水作为研究对象,而很少研究粮食作物对水资源的利用特征;其次,以往研究成果大多仅研究绿水和蓝水足迹,而较少考虑灰水足迹,因此无法评价灰水足迹所体现出来的在农业生产过程中需要额外耗费的生态修复水量;第三,以往研究大多采用描述性方法或者聚类分析方法评价水足迹强度等指标的空间特征,由于这些方法受主观影响较大,得出的解释并不唯一,因此研究结论缺乏可靠性。

本文以狭义农业(种植业)为研究对象,利用 CROPWAT 软件测量中国 31 个省区小麦、玉米和水稻三种主要粮食作物在生产过程中产生的水足迹;并根据测量结果对粮食作物耗水量与生态修复需水量分别进行定量评价;然后在此基础上进一步利用水足迹强度指标,评价中国各省区粮食作物的水资源利用效率,并利用探索性空间数据分析方法对其空间分布特征进行评价。

一、研究方法 with 数据来源

1. 水足迹的测算

(1)绿水和蓝水足迹。本文采用联合国粮农组织(FAO)推荐的标准彭曼公式,计算某种粮食作物的单位质量需水量,并在此基础上进一步得到该种粮食作物的单位质量绿水、蓝水足迹值,将其乘以各省区该种粮食作物的产量可以得到该种粮食作物的绿水与蓝水足迹^[13-17]总量。为简化计算,本文考虑理想种植条件下的三种主要粮食作物的水足迹值,基本公式如下:

$$ET_c = CWR \quad (1)$$

$$CWR = \frac{CWU}{CY} \quad (2)$$

$$CWU = 10 \times \sum_{d=1}^{lgP} ET \quad (3)$$

$$ET = K_c \times ET_0 \quad (4)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

$$WF_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (6)$$

$$WF_{blue} = 0 \quad WF_{green} > CWR \quad (7)$$

$$WF_{blue} = CWR - WF_{green} \quad WF_{green} < CWR$$

式(1)~(5)中, CWR , CWU , CY , ET , K_c 和 ET_0 分别表示作物的单位质量需水量(m^3/kg),单位面积需水量(m^3/m^2),单位面积产量(kg/m^2),蒸发累积量,作物系数以及参考作物蒸发蒸腾水量(mm/d)。其中, CWR 不能直接由软件得到,而是需要根据粮食作物产量数据进行转化计算取得,即某区域内粮食作物 a 的单位质量需水量 CWR 等于该作物的单位面积需水量 CWU 与单位面积产量 CY 之比; CWU 约等于生长周期内的蒸发累积数量 ET 的10倍; ET 的计算基于参考作物蒸发蒸腾水量 ET_0 ;作物系数 K_c 反映了粮食作物本身的生物特性对作物需水量的影响,例如土壤、栽培条件、产量水平、叶面积等特性; ET_0 运用联合国粮农组织(FAO)推荐并修正的标准彭曼-蒙蒂斯公式进行求解,它仅考虑气象参数对农作物需水量的影响,而忽略作物类型、作物发育以及管理措施等因素的作用。另外, Δ 表示温度-饱和水汽压关系曲线在 T 处的切线斜率($kPa^\circ C^{-1}$), R_n 表示净辐射($MJ/m^2 \cdot d$), G 表示土壤热通量($MJ/m^2 \cdot d$), γ 表示湿度表常数($kPa^\circ C^{-1}$), T 表示平均气温($^\circ C$), U_2 表示2 m高处风速(m/s), e_a 表示饱和水汽压(kPa), e_d 表示实际水汽压(kPa)。

式(6)表示 WF_{green} (单位质量作物绿水足迹),取农作物生长过程中的蒸发水量 ET_c 和有效降水量 P_{eff} 中的较小者。在理想的种植条件下,单位质量的 ET_c 等于单位质量的作物需水量 CWR ; P_{eff} 可由 CROPWAT 软件直接取得。式(7)表示 WF_{blue} (单位质量作物蓝水足迹),在假设粮食作物都得

到充分灌溉(即有效灌溉供水量约等于灌溉需水量)的情况下,可以粗略的由灌溉需水量表示,即作物需水量 CWR 与绿水足迹 WF_{green} 之差。若 $WF_{green} > CWR$, 则表明绿水足迹总量足以满足作物生长需要,因此粮食作物不需要灌溉,蓝水足迹量为零;否则 WF_{blue} 等于 CWR 与 WF_{green} 之差。

(2) 灰水足迹。根据灰水足迹的定义,灰水足迹可以理解为将农业面源污染稀释至符合规定的淡水标准所需要的生态修复需水量。由于化肥是粮食生产过程中重要的投入要素,因此本文主要考虑化肥投入引起的污染。为了估算出各粮食作物的化肥施用量,本文分别以三种粮食作物的播种面积占各地区农作物总播种面积的比重作为分解系数,将各粮食作物的化肥施用量从化肥施用总量中分解出来。由于粮食生产过程中所投入的化肥,含有氮、磷、钾等不同的离子,而磷离子、钾离子可以与土壤中的其他矿物质反应生成不易溶解的化合物或者被土壤中的胶体离子吸收而不容易被过滤掉,因此不容易对环境造成污染,相比之下氮离子很容易进入水体,污染地下水和地表水。因此为了简化处理,本文测量灰水足迹时仅考虑化肥氮素污染。

根据现有研究,假定化肥中总氮施用量的 10% 会作为污染物进入到地下水或者地表水^[18], 则灰水足迹(稀释每吨氮离子所需要的水量)的计算公式如下:

$$WF_{grey} = \frac{\text{氮污染量}}{\text{氮离子标准浓度限值} - \text{氮离子原始浓度}} \quad (8)$$

根据 EPA 的标准,氮离子的标准浓度限值假定为 10 mg/L,氮离子在水体中的原始浓度假定为 0。

(3) 作物生长阶段的水足迹总量。本文定义粮食作物在生长周期内所产生的水足迹总量是绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹之和,即:

$$WF_{total} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (9)$$

2. 数据来源

本文以小麦、玉米和水稻三种主要粮食作物为研究对象,研究中国 31 个省区(不包括台湾、香港和澳门)的水足迹特征。

本文所用到的各气象站点的地区名称、海拔、经度、纬度、温度、湿度、风速、日照、辐射强度、参考作物蒸发蒸腾量、每月实际降雨量以及每月有效降雨量等数据均从 FAO 的 CLIMWAT 数据库中调用;作物的种植模式信息,例如生长周期长度、作物系数、根植深度等数据资料来源于 CROPWAT 软件以及各地区的农业研究机构;土壤数据是根据研究区域的主要土壤类型,从 FAO 全球数据库中查找相应的土壤信息取得。另外,本文中各省区的气象和作物生长信息均以该省省会数据为准,其中由于青海省省会西宁市的数据未在 CLIMWAT 数据库中列出,因此选取都兰市作为代表。水足迹相关数据的测量通过 CROPWAT 软件和 CLIMWAT 数据库实现。

此外,本文将通过 CROPWAT 软件得到的粮食作物单位面积需水量(CWU)转化为单位质量需水量(CWR)时,所用到的粮食作物年产量、种植面积等数据均来源于《中国农村统计年鉴》和《中国农业年鉴》;测量灰水足迹所用到的氮肥施用量数据来源于《中国统计年鉴》和《新中国五十年农业统计资料》。

二、结果评价

1. 绿水和蓝水足迹:耗水量评价

表 1 列示了小麦、玉米和水稻在 1998—2013 年间的绿水和蓝水消耗情况,结果表明:首先,从两种水足迹总量来看,三种粮食作物的绿水、蓝水足迹总量存在较大的地区差异^[19],其中河南、山东的绿水、蓝水足迹总量处于较高水平,其次是河北、江苏、安徽、湖北、四川、陕西、山西、甘肃等省份,浙江、福建、广东等沿海省份虽然具备农业生产优势,但是粮食生产的绿水、蓝水足迹总量相对较小;其次,从绿水足迹看,江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、广东等省份的小麦、玉米和水稻的绿水足迹占当地水足迹总量的比重较大,平均可达到 50% 左右,而这些省区的蓝水足迹比重相对较小;最后,从蓝水足迹看,河北、山东、河南、内蒙古、山西、陕西、甘肃、青海、新疆、宁夏等水资源相对稀缺的华北和西北地

区,三种作物生产过程中的蓝水足迹所占比重较大,蓝水足迹平均可以占到粮食生产所消耗水足迹总量的一半以上,部分省份可以达到70%。

表1 1998—2013年粮食作物的绿水、蓝水足迹总量及绿水、蓝水足迹占比

省份	小麦			玉米			水稻		
	两种足迹 总量/亿 m ³	绿水足迹 占比/%	蓝水足迹 占比/%	两种足迹 总量/亿 m ³	绿水足迹 占比/%	蓝水足迹 占比/%	两种足迹 总量/亿 m ³	绿水足迹 占比/%	蓝水足迹 占比/%
北京	4.200	13.986	86.014	5.265	95.331	4.669	0.308	56.426	43.574
天津	4.015	24.952	75.048	5.350	100.000	0.000	1.255	64.931	35.069
河北	104.612	24.204	75.796	98.494	89.353	10.647	6.136	53.820	46.180
山西	41.385	17.796	82.204	46.832	69.448	30.552	0.184	41.383	58.617
内蒙古	23.921	32.583	67.417	89.496	51.692	48.308	6.051	40.128	59.872
辽宁	1.978	60.550	39.450	83.149	77.729	22.271	38.351	42.660	57.340
吉林	0.946	62.260	37.740	118.550	79.981	20.019	37.133	43.938	56.062
黑龙江	15.316	52.510	47.490	141.633	67.800	32.200	134.879	53.409	46.591
上海	2.199	96.405	3.595	0.199	100.000	0.000	6.887	84.419	15.581
江苏	79.513	93.119	6.881	16.072	100.000	0.000	130.394	83.935	16.065
浙江	3.695	100.000	0.000	1.652	100.000	0.000	51.283	100.000	0.000
安徽	98.074	87.542	12.458	27.536	95.633	4.367	120.006	73.530	26.470
福建	0.665	100.000	0.000	1.540	100.000	0.000	46.732	100.000	0.000
江西	1.085	100.000	0.000	0.994	87.697	12.303	157.728	100.000	0.000
山东	142.488	32.030	67.970	101.028	100.000	0.000	8.690	68.286	31.714
河南	419.312	37.125	62.875	111.499	79.064	20.936	43.407	45.038	54.962
湖北	45.636	100.000	0.000	20.068	100.000	0.000	122.340	93.138	6.862
湖南	2.672	100.000	0.000	12.194	83.632	16.368	183.466	100.000	0.000
广东	0.308	100.000	0.000	5.722	100.000	0.000	95.930	100.000	0.000
广西	0.537	86.188	13.812	23.840	100.000	0.000	130.510	99.793	0.207
海南	0.000	—	—	0.524	100.000	0.000	22.869	84.520	15.480
重庆	10.964	100.000	0.000	17.663	100.000	0.000	34.290	100.000	0.000
四川	47.279	54.404	45.596	36.564	100.000	0.000	85.740	87.344	12.656
贵州	16.633	98.769	1.231	23.960	100.000	0.000	33.155	100.000	0.000
云南	34.265	37.457	62.543	40.654	100.000	0.000	57.435	70.194	29.806
西藏	1.887	38.033	61.967	0.162	56.684	43.316	0.072	24.889	75.111
陕西	54.420	44.998	55.002	43.855	67.077	32.923	9.071	41.858	58.142
甘肃	41.902	28.404	71.596	27.186	38.868	61.132	0.381	28.746	71.254
青海	5.594	20.081	79.919	0.318	24.949	75.051	0.000	—	—
宁夏	11.958	14.742	85.258	9.585	19.423	80.577	5.184	10.282	89.718
新疆	42.628	19.336	80.664	32.485	14.836	85.164	4.851	17.969	82.031

2.灰水足迹:生态修复需水量评价

(1)不同年份的灰水足迹总量。1998—2013年小麦、玉米和水稻作物灰水足迹均值的变化趋势如图1所示,结果表明:首先,三种粮食作物的灰水足迹总量总体上均呈现出在波动中持续上升的趋势,其中在2003年之前呈下降趋势,而在2003年之后则呈现出缓慢地上升态势。这种阶段性变化出现的原因可能是:1998—2003年间全国粮食出现大规模减产,而在2003年以后,粮食总产量开始出现大幅度增长,并因此增加了化肥的使用量,进而产生了更多的污染,所以生态修复需水量出现了增长趋势;其次,水稻作物的灰水足迹总量最高,小麦次之、玉米最低。这表明水稻生产过程产生了更多的化肥氮素污染,从而具有更大的生态修复需水量,以补偿化肥氮素污染所导致的生态失衡。

(2)不同省区的灰水足迹总量。我国各省区三种主要粮食作物的生态修复需水量(灰水足迹)情况如表2所示,具体分为华北、东北、华东、华中、华南、西南、西北七大区域。从灰水足迹总量来看,中

国各省区在小麦、玉米和水稻的生产过程中均产生了大量的灰水足迹,其中灰水足迹总量较大的地区主要集中于东北、华北、华东、华中等粮食主产区省份,而西藏、青海等西部地区的灰水足迹较小;从灰水足迹占水足迹总量的比重来看,华北、华东、华中和西南等省区灰水足迹的比重较高,这表明这些地区由于化肥使用所导致的面源污染程度较为严重,应该采取措施加以控制。

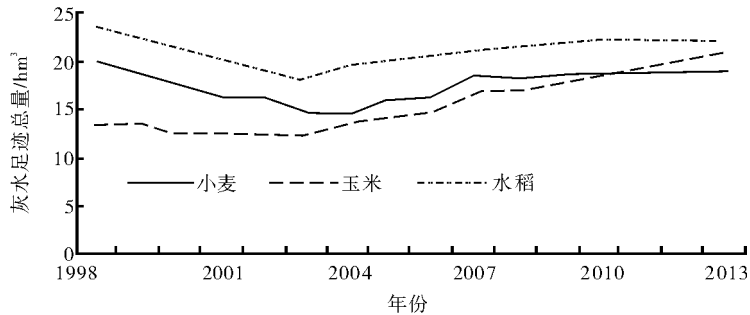


图 1 1998—2013 年三种粮食作物灰水足迹总量的变化趋势

表 2 中国各区域三种粮食作物的灰水足迹及其在水足迹总量中的比重

地区	省份	小麦			玉米			水稻		
		灰水足迹/亿 m ³	水足迹总量/亿 m ³	灰水足迹占比/%	灰水足迹/亿 m ³	水足迹总量/亿 m ³	灰水足迹占比/%	灰水足迹/亿 m ³	水足迹总量/亿 m ³	灰水足迹占比/%
华北地区	北京	2.101	6.301	33.344	3.799	9.063	41.914	0.137	0.444	30.759
	天津	2.528	6.544	38.639	3.646	8.995	40.529	0.461	1.716	26.876
	河北	55.996	160.609	34.865	63.386	161.880	39.156	2.247	8.383	26.808
	山西	7.068	48.453	14.587	11.382	58.214	19.551	0.025	0.208	11.864
	内蒙古	4.592	28.513	16.104	18.106	107.602	16.827	0.755	6.806	11.086
东北地区	辽宁	0.726	2.704	26.847	29.390	112.539	26.116	9.528	47.879	19.901
	吉林	0.275	1.221	22.519	34.062	152.611	22.319	7.615	44.749	17.018
	黑龙江	1.900	17.216	11.035	18.729	160.362	11.679	12.049	146.928	8.201
华东地区	上海	1.650	3.848	42.862	0.159	0.358	44.330	4.455	11.342	39.277
	江苏	72.352	151.864	47.642	15.397	31.469	48.928	81.058	211.452	38.334
	浙江	2.808	6.503	43.185	1.251	2.904	43.091	31.540	82.823	38.081
	安徽	43.397	141.471	30.676	13.459	40.995	32.830	42.535	162.540	26.169
	福建	0.585	1.250	46.801	1.405	2.945	47.716	36.524	83.256	43.870
	江西	0.403	1.488	27.090	0.336	1.330	25.261	49.186	206.913	23.771
华中地区	山东	84.046	226.534	37.101	65.261	166.289	39.245	3.357	12.047	27.867
	河南	143.836	563.147	25.541	74.557	186.056	40.072	15.797	59.204	26.682
	湖北	27.775	73.411	37.835	13.935	34.003	40.982	61.459	183.799	33.438
	湖南	1.778	4.450	39.954	7.588	19.782	38.361	104.667	288.133	36.326
	海南	0.000	0.000	—	0.205	0.729	28.179	5.226	28.095	18.602
华南地区	广东	0.184	0.492	37.475	5.011	10.733	46.686	68.003	163.933	41.482
	广西	0.138	0.675	20.430	8.237	32.077	25.679	33.284	163.794	20.321
	重庆	4.612	15.576	29.611	8.347	26.011	32.092	12.707	46.997	27.037
	四川	29.057	76.336	38.065	26.961	63.525	42.441	43.224	128.964	33.516
	贵州	3.666	20.299	18.061	7.152	31.111	22.987	6.867	40.021	17.157
西南地区	云南	6.807	41.072	16.573	16.976	57.630	29.457	13.974	71.410	19.569
	西藏	0.199	2.086	9.531	0.017	0.179	9.524	0.005	0.076	6.414
	陕西	22.105	76.526	28.886	19.873	63.728	31.185	2.370	11.441	20.715
	甘肃	7.287	49.189	14.815	4.576	31.762	14.408	0.040	0.421	9.598
西北地区	青海	0.676	6.271	10.785	0.042	0.360	11.681	0.000	0.000	—
	宁夏	3.432	15.389	22.301	2.703	12.288	22.000	1.051	6.236	16.861
	新疆	13.565	56.193	24.139	9.092	41.577	21.869	1.053	5.904	17.840

三、水足迹强度:水资源利用效率评价

1.水足迹强度的时间特征

水足迹强度是水足迹总量与粮食作物产值之和的比值,是一个全新的反映水资源利用效率的指标,水足迹强度越大,表明水资源利用效率越低。本文以绿水、蓝水和灰水足迹三者之和作为水足迹总量,并根据农林牧渔业总产值的计算方法(即产品法,以农产品产量与现行价格^①的乘积作为农产品的产值)取得小麦、玉米和水稻的产值数据,然后在此基础上测量我国各省区粮食作物生产的水足迹强度值。

本文将1998—2013年划分为四个阶段,每个阶段内各省区的水足迹强度均值如图2所示。结果显示:首先,我国31个省区的水足迹强度在四个时间段内均呈现出显著的下降趋势,这表明我国粮食生产所用水资源的利用效率正在显著提高。其次,在这四个阶段内,各省区的水足迹强度呈现出相对一致的变化趋势,并且各省区之间水足迹强度的相对变化较为稳定,这可能是由于各省区的粮食生产结构大致维持在一个相对稳定的状态。

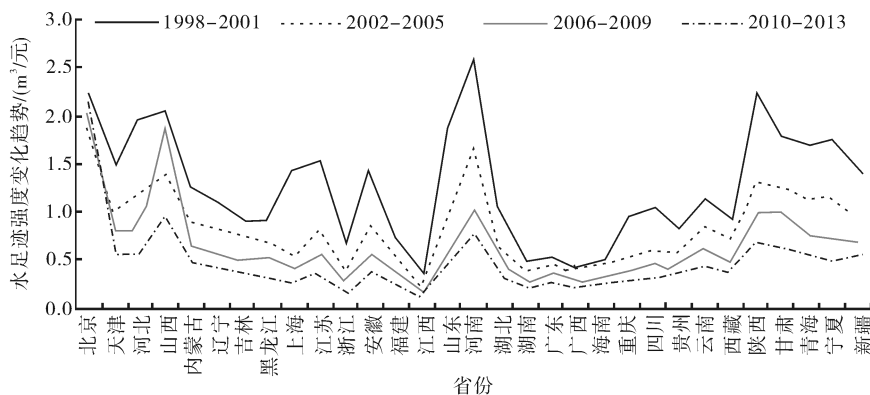


图2 四个阶段内中国各省区粮食作物的水足迹强度均值变化趋势

2.水足迹强度的空间特征

本文利用探索性空间^[20-24]数据分析方法(ESDA)定量分析我国粮食作物综合水足迹强度的空间分布格局,作为ESDA技术的核心内容之一,空间自相关分析与局域自相关分析的结论如下所示。

(1)全局空间自相关分析。1998—2013年我国粮食作物水足迹强度的全局空间自相关Moran's I 指数值如表3所示。结果显示:首先,各年份对应的 Z 值均大于1.96, P 小于0.01,表明历年Moran's I 指数均通过了 Z 统计量检验,并在1%的水平上显著。这意味着各省区的水足迹强度在不同时期均呈现出显著的空间正相关性,即水资源利用效率出现了高高集聚和低低集聚的特征,这可能是由于粮食作物的水足迹强度受到各省区内部作物类型、土壤类型、气候状况、灌溉特征等多种因素的影响,而这些因素通常会呈现出地理空间上的集聚特征,因此使得水足迹强度也具备了空间上的集聚效应。其次,Moran's I 指数自1998年以来出现略微下降的态势,这表明粮食作物水足迹强度的空间相关性稍有减弱。

表3 1998—2013年中国各省区粮食作物水足迹强度的全局Moran's I 指数

Year	Moran's I	$Z(I)$	P -value
1998	0.134	5.355	0.000
1999	0.148	5.740	0.000
2000	0.158	6.057	0.000
2001	0.156	6.047	0.000
2002	0.152	5.876	0.000
2003	0.133	5.357	0.000
2004	0.150	6.122	0.000
2005	0.153	6.162	0.000
2006	0.148	6.015	0.000
2007	0.127	5.512	0.000
2008	0.054	3.442	0.000
2009	0.098	4.761	0.000
2010	0.087	4.514	0.000
2011	0.091	4.526	0.000
2012	0.033	3.011	0.001
2013	0.008	5.044	0.000

① 现行价格采用农产品生产价格,即生产者第一手出售农产品的价格,其数据来源于农产品生产价格调查。

(2)局域空间自相关分析。由于全局 Moran's I 指数仅能判断粮食作物水足迹强度在空间上是否存在集聚特性,但却无法准确判断集聚的具体位置是什么。因此本文进一步根据 Moran 散点图和局部 Moran's I 指数,利用 Geoda 软件制作出 1998—2013 年我国各省区粮食作物水足迹强度的 LISA 集聚地图,相关属性值如表 4 所示。

表 4 四个时间段内中国各省区三种主要粮食作物水足迹强度的 LISA 属性

	HH/P-Value	LH/P-Value	LL/P-Value	HL/P-Value
1998—2001	内蒙古、宁夏、河南/(0.05);陕西、山西、河北、山东、北京、天津/(0.01)		云南、贵州、湖南/(0.05);广西、广东、海南/(0.01)	
2002—2005	山东、宁夏/(0.05);内蒙古、陕西、山西、河北、北京、天津/(0.01)		贵州、海南/(0.05);湖南、江西、福建、广西、广东/(0.01)	云南/(0.05)
2006—2009	山东、陕西、宁夏/(0.05);内蒙古、山西、河北、北京、天津/(0.01)		云南、贵州/(0.05);湖南、江西、福建、广西、广东、海南/(0.01)	
2010—2013	山西、陕西、河北、北京、天津/(0.01)	山东/(0.05);内蒙古/(0.01)	云南、浙江、海南/(0.05);湖南、江西、福建、广西、广东/(0.01)	

注:HH、LH、LL、HL 分别表示高高集聚(高值区域被高值区域包围)、低高集聚(低值区域被高值区域包围)、低低集聚(低值区域被低值区域包围)和高低集聚(高值区域被低值区域包围)。

表 4 结果显示:第一,在四个考察时段内,全国大部分省区出现了显著的局域空间正相关特征,空间正相关的省区个数分别为 15、15、16 和 13,其中高高集聚区(HH)的省区个数分别为 9、8、8、5,低低集聚区(LL)的省区个数分别为 6、7、8、8。这表明各省区粮食作物的水足迹强度具有显著的局部集聚现象,即粮食生产用水效率出现了空间上的局部正相关特征。第二,从水足迹强度的 LISA 属性中可以看出,水足迹强度较高的区域主要集中于我国的西北和华北地区,而水足迹强度较低的区域主要集中在西南、华东和华南地区。这表明西北、华北等地区的粮食生产具有更低的水资源利用效率,而西南、华东和华南地区的水资源利用效率则相对较高。第三,1998—2013 年间,高高集聚的省区个数呈现出下降趋势,低低集聚的省区个数则呈现出上升趋势。由于水足迹强度越低意味着水资源利用效率越高,因此这意味着我国粮食作物的水资源利用效率正得到逐步提高。

四、结 论

本文以水足迹理论为基础,利用 CROPWAT 软件测量了小麦、玉米和水稻三种粮食作物的绿水、蓝水和灰水足迹,然后根据测量结果从粮食作物耗水量与生态修复需水量两个角度进行了评价,并在此基础上测量了我国粮食作物的水足迹强度,并对其空间特征进行了研究。主要得出以下结论:

(1)我国小麦、玉米和水稻三种粮食作物的绿水、蓝水足迹总量具有较大的地区差异,其中河南、山东、江苏等粮食主产区省份消耗的绿水、蓝水足迹总量较高,而浙江、福建等经济发达省份所消耗的绿水、蓝水足迹总量相对较小;对江苏、浙江等降雨量充沛的省份而言,绿水消耗量占当地水消耗量的比重较大,平均可达到 50%左右,而对山西、陕西、甘肃等水资源稀缺的省份来说,蓝水消耗量占了较大比重,部分省份可以达到 70%。

(2)小麦、玉米和水稻三种粮食作物的灰水足迹总量在总体上呈现出持续上升的趋势,但在 2003 年前后出现了不同的变化特征,尤其在 2003 之前呈下降趋势,而在此之后则逐渐呈现出缓慢的上升趋势;我国粮食作物灰水足迹总量较大的地区主要集中于华北、东北、华东、华中等粮食主产区省份,其中华北、华东、华中等地区的灰水足迹占水足迹总量的比重较高,说明这些地区的化肥污染较为严重。

(3)1998—2013 年间我国 31 个省区的粮食作物水足迹强度具有明显下降趋势,并且各省区之间水足迹强度的相对变化较为稳定,这表明在水足迹视角下,我国各省区粮食生产的水资源利用效率呈现出显著的下降趋势;我国粮食作物的水足迹强度具有显著的空间正相关性,从水足迹强度角度来说,西北和华北地区的水资源利用效率较低,而西南、华东和华南地区的水资源利用效率则相对较高。

参 考 文 献

- [1] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [2] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.
- [3] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 486-495.
- [4] 汪党献, 王浩, 马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报, 2001(4): 21-26.
- [5] 夏军, 张永勇, 王中根, 等. 城市化地区水资源承载力研究[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1482-1488.
- [6] 李保国, 黄峰. 1998-2007年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 575-583.
- [7] 刘渝, 张俊飏. 中国水资源生态安全与粮食安全状态评价[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2292-2297.
- [8] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water resources management, 2007, 21(1): 35-48.
- [9] KAMPMAN D A, HOEKSTRA A Y, KROL M S. The water footprint of India [R]. Value of Water Research Report Series, UNESCO-IHE, 2008.
- [10] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 等. 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.
- [11] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 1022-1034.
- [12] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1826-1835.
- [13] ERCIN A E, ALDAYA M M, HOEKSTRA A Y. Corporate water footprint accounting and impact assessment: the case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage[J]. Water resources management, 2011, 25(2): 721-741.
- [14] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2005, 20(6): 909-915.
- [15] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. Ecosystems, 2012, 15(3): 401-415.
- [16] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. Ecological economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [17] OKADERA T, OKAMOTO N. Regional water footprints of the yangtze river: an interregional input-output approach[J]. Economic systems research, 2014, 26(4): 444-462.
- [18] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1169-1178.
- [19] 李世祥, 成金华, 吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 215-220.
- [20] 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.
- [21] 崔远来, 董斌, 李远华. 水分生产率指标随空间尺度变化规律[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 45-51.
- [22] 郭菊娥, 邢公奇, 何建武. 黄河流域水资源空间利用结构的实证分析[J]. 管理科学学报, 2005, 8(6): 37-42.
- [23] 封志明, 杨艳昭, 张晶, 等. 从栅格到县域: 中国粮食生产的资源潜力区域差异分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 747-755.
- [24] 孙爽, 杨晓光, 李克南, 等. 中国冬小麦需水量时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 72-82.

(责任编辑: 金会平)