

# 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制

操信春<sup>1,2</sup>, 刘 喆<sup>2</sup>, 吴梦洋<sup>2</sup>, 郭相平<sup>2</sup>, 王卫光<sup>1\*</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学农业工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 为全面评估区域农业水资源供需关系, 基于水足迹理论构建了耕地水资源短缺指数 (arable land water scarcity index, AWSI)。在分析 1999—2014 年中国 AWSI 时空分布格局的基础上, 借助偏最小二乘法揭示了 AWSI 的主控因子。结果显示: 中国 AWSI 的年均值约为 0.413, 总体上处于高度水资源压力状态, 且有随时间加剧的趋势; 各年份 AWSI 以华北平原为中心向外递减式扩散; 面临极高水资源压力 (AWSI>0.800) 的省区均分布在北方地区, 长江以南省区均面临中度水资源压力 (0.100<AWSI<0.400); 降水量与日照时数是与耕地水短缺最为密切的气象因子, 农业机械总动力、粮食面积比重以及人均 GDP 是影响 AWSI 的主要社会经济条件。农业生产水平较高的粮食主产区应以水足迹调控为重要内容进行农业水管理策略的制定。

**关键词:** 水资源; 偏最小二乘回归; 农业; 高效用水; 蓝绿水; 灰水足迹; 评价指标

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.012

中图分类号: TV213.9; S279

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0094-07

操信春, 刘 喆, 吴梦洋, 郭相平, 王卫光. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 94—100. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.012 http://www.tcsae.org

Cao Xinchun, Liu Zhe, Wu Mengyang, Guo Xiangping, Wang Weiguang. Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 94—100. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.012 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

日益严重的水短缺问题已经被视为全球的系统性风险<sup>[1]</sup>。作为水资源消耗最大的部门, 农业高效用水不仅直接决定食物生产也与生态安全密切相关, 缓解农业水短缺是促进区域水资源持续利用的重要措施<sup>[2]</sup>。农业生产过程涉及复杂的水文循环和面源污染源的迁移过程, 消耗水资源同时对环境造成不利影响。因此, 水资源利用的效率和可持续性为农业生产与水资源之间关系评价的主要内容。前者关注所占用水资源在农业生产系统的表现, 而后者还涉及区域水资源承载能力<sup>[3-6]</sup>。基于水资源收支对比的水短缺指标构建是进行区域用水可持续性评价最常用的手段<sup>[7-8]</sup>。随着研究视角的演变, 水资源收支的核算手段已由传统水资源取用发展到同时衡量水量和水质的水足迹方法<sup>[9]</sup>。具体到农作物水足迹为作物生长过程中所直接和间接需求的水资源量, 包括蓝水、绿水及灰水足迹<sup>[10-11]</sup>。其中蓝水和绿水足迹分别为灌溉水和土壤存储有效降水的消耗数量, 灰水足迹则为农业生产过程所

排放污染物的稀释水量<sup>[12]</sup>。水足迹理论的核心内涵为广义水资源与真实水耗用, 不仅核算作物生长对蓝绿水资源的消耗, 还量化了其对水环境的影响。在不同时空尺度作物水足迹评估的基础上<sup>[13-14]</sup>, 学者开始建立相应区域水资源短缺评价指标, 如水短缺足迹<sup>[15-16]</sup>、用水效果<sup>[17]</sup>, 水质短缺指数<sup>[18]</sup>以及水足迹稀缺性<sup>[19]</sup>等。然而这些方法仍大多以蓝水为评估对象, 未将占主导地位的绿水考虑为水资源短缺评价的参与因素, 也没有很好地将广义水资源和真实水消耗相统一。本文拟在水足迹理论视角下, 建立耕地水资源短缺指数 (arable land water scarcity index, AWSI); 在核算 AWSI 时空分布格局的基础上识别其主要影响因子; 并以实现区域农业水资源高效可持续利用目标, 展开农业水足迹调控策略和水资源短缺缓解措施方面的探讨, 以期在发展水资源管理相关科学理论的同时, 为区域农业用水相关宏观策略的制定提供参考。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 耕地水资源短缺指数

本文基于水足迹理论视角下的广义水资源与真实水耗用内涵, 构建如下耕地水资源短缺评价指标:

$$AWSI = CWF / AWR \quad (1)$$

式中 AWSI 为耕地水资源短缺指数, 无量纲; CWF 为区域农作物水足迹总量,  $m^3$ ; AWR 为区域农业广义水资源量, 即可以提供作为农作物生产的蓝水和绿水水资源量,  $m^3$ 。

$$CWF = CWF_b + CWF_g + CWF_{grey} \quad (2)$$

$$AWR = AWR_b + AWR_g \quad (3)$$

收稿日期: 2019-03-12 修订日期: 2019-08-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51979074、51609065); 国家重点研发计划 (2018YFF0215702); 江苏省社会科学基金 (17GLC013); 中国博士后科学基金资助项目 (2018T110436, 2017M611681)

作者简介: 操信春, 博士, 教授, 主要从事农业水资源高效利用研究。

Email: caoxinchun@hhu.edu.cn。

\*通信作者: 王卫光, 博士, 教授, 主要从事水资源演变与高效利用研究。

Email: wangweiguang@hhu.edu.cn。

中国农业工程学会会员: 操信春 (E040000462A)

式中  $CWF_b$ 、 $CWF_g$  及  $CWF_{grey}$  分别为作物的蓝水、绿水和灰水足迹,  $m^3$ ;  $AWR_g$  为耕地土壤可储存的有效降水总量,  $m^3$ 。参照《水足迹评价手册》,  $CWF_b$  与  $CWF_g$  基于作物需水量估算<sup>[17]</sup>,  $CWF_{grey}$  的计算方法为

$$CWF_{grey}=\alpha F/(c_{max}-c_{nat}) \tag{4}$$

式中  $F$  为化肥施用量,  $kg$ ;  $\alpha$  为淋溶率;  $c_{max}$  为水体最大容许浓度,  $kg/m^3$ ;  $c_{nat}$  为自然本底浓度,  $kg/m^3$ 。  $AWR_b$  与  $AWR_g$  分别为农业可利用蓝水(常规水资源)和绿水资源量。由于数据缺乏, 按区域蓝水资源供给于不同行业可能性均等之假设, 计算  $AWR_b$  为

$$AWR_b=TWR\cdot AWU/TWU \tag{5}$$

式中  $TWR$  为区域常规水资源总量,  $m^3$ ;  $TWU$  与  $AWU$  分别为总用水量与农业用水量,  $m^3$ 。

$$AWR_g=0.1A\cdot P_e \tag{6}$$

式中  $A$  为耕地面积,  $ha$ ;  $P_e$  为有效降水,  $mm$ ;  $P_e$  在收集降水量  $P$  的基础上以旬为步长, 采用下式对地区和土壤类型均有较广泛适用性的方法计算<sup>[20]</sup>:

$$P_e=\begin{cases} P(4.17-0.02P)/4.17, & P<83 \\ 41.7+0.1P, & P\geq83 \end{cases} \tag{7}$$

基于广义农业水资源与水足迹理论构建 AWSI, 可全面揭示区域在满足农业生产过程对水资源及水环境需求上的能力, 受区域降雨、灌溉设施、管理水平、耕作措施及耕地率等影响。高 AWSI 值意味着区域的农业生产用水可持续不足, 区域同时面临较严峻的水资源及水环境压力。将 AWSI 指标进行等级划分可直观判断特定区域的水资源短缺程度并为进行区域间对比提供便捷。当前缺乏基于水足迹视角, 同时考虑蓝、绿和灰水足迹的区域水资源短缺指标构建及等级划分。Raskin 等<sup>[21]</sup>提出的以传统水资源(蓝水)为对象区域水短缺(water shortage index, WSI) 的等级划分方法已被学术界认可和广泛采用<sup>[22-23]</sup>。由于 AWSI 与 WSI 构建的原理相同, 即同为区域水资源耗用量与水资源可利用量之间比值的核算。因此, 参照 WSI, AWSI 等级阈值及其所对应的水短缺程度如表 1 所示。

表 1 基于耕地水资源短缺指数的耕地水资源短缺等级划分  
Table 1 Category of water stress of farmland based on arable land water scarcity index (AWSI)

耕地水资源短缺指数 AWSI	水短缺等级 Water stress level
<0.100	无水资源压力 No water stress
0.100~<0.200	低度水资源压力 Low water stress
0.200~<0.400	中度水资源压力 Mid water stress
0.400~0.800	高度水资源压力 High water stress
>0.800	极高水资源压力 Very high water stress

1.2 空间自相关和偏最小二乘回归

全局空间自相关可以描述某种地理属性在整个区域(全国)的空间特征, 并判定该属性值在空间上是否表现聚集特征。具体通过计算全局 Moran's  $I$  的来揭示 AWSI 的总体空间关联或差异特征。在给定显著水平(0.01)时, 若 Moran's  $I$  值显著(即 Z-score 大于 2.58)为正, 表示 AWSI 相当的省区在空间聚集, 否则各省区与其周边地区 AWSI 总体上差异较大<sup>[24]</sup>。

在量化空间格局的基础上, 借助偏最小二乘回归(partial least-squares regression, PLSR)来分析 AWSI 的驱动机制。PLSR 在进行因变量对自变量的回归建模中, 能够有效地解决多元回归分析中的变量多重共线性问题<sup>[25]</sup>。采用成分提取的方法, 用少数几个综合指标来代表原有的众多因素, 综合后的新指标为能综合反映原有众多因素的大部分信息的原有因素主成分。PLSR 权重是原始变量所定义分数的线性组合, 它们可用来描述预测变量和 PLSR 主成分之间的定量关系。参数变量投影重要性指标(variable importance for the projection, VIP)可以用来表示自变量对因变量预测的重要程度, 该指标值大的因素在解释 AWSI 时相关性较高。同时, 利用回归系数来量化 PLSR 模型中每个因素对 AWSI 影响的方向与强度。选择 11 个因素作为 PLSR 空间分析的响应变量, 在进行建模之前将驱动因素进行初步相关性分析, 结果见表 2。

表 2 AWSI 驱动因子的相关矩阵  
Table 2 Correlation matrix of selected driving factors of AWSI

因素 Factor	AT	P	SH	CF	PP	MP	IR	IE	GA	GP
RH	0.642**	0.747**	-0.820**	0.327	0.470**	-0.259	-0.083	0.056	-0.145	0.041
AT	1	0.766**	-0.513**	0.686**	0.630**	-0.084	0.352	-0.111	-0.401*	0.261
P		1	-0.582**	0.387*	0.682**	-0.299	0.155	-0.254	-0.479**	0.057
SH			1	-0.184	-0.259	0.257	0.102	0.003	0.135	0.030
CF				1	0.641**	0.304	0.549**	0.299	-0.348	0.570**
PP					1	0.130	0.493**	0.085	-0.407*	0.483**
MP						1	0.445*	0.270	0.056	0.428*
IR							1	0.152	-0.465**	0.610**
IE								1	0.133	0.468**
GA									1	-0.211

注: \*\*表示在 0.01 水平上显著相关; \*表示在 0.05 水平上显著; 相对湿度(RH)、平均气温(AT)、降水量(P)、日照时数(SH)、地均化肥(CF)、地均农药(PP)、地均机械总动力(MP)、灌溉率(IR)、灌溉效率(IE)、粮食面积比例(GA)以及人均 GDP(GP), 下同。  
Note: \*\*Correlation is significant at 1%, \*Correlation is significant at 5%. Abbreviations: relative humidity (RH), average temperature (AT), precipitation (P), sunshine hours (SH), chemical fertilizer per area (CF), pesticides per area (PP), power of machinery per area (MP), irrigation rate (IR), irrigation efficiency (IE), proportion of grain area (GA) and per capita GDP (GP), the same as below.

### 1.3 数据来源

本文的研究区域为中国大陆 31 个省级行政单元, 研究时段为 1999—2014 年。各省区历年水资源总量、用水量及农业用水量来自 1999—2014 年的《中国水资源公报》; 各省区历年耕地面积、农作物播种面积和产量、化肥施用量、人口、GDP、有效灌溉面积、农业机械总动力等数据来自《中国统计年鉴》。各省区主要气象站点的气象数据来自中国气象数据平台 (<http://data.cma.cn>); 作物系数参考文献[26-27]和水利部灌溉试验总站收集资料; 灌溉效率由水资源公报及各省大型灌区测算值对有效灌溉面积的加权得到。

## 2 结果与分析

### 2.1 中国耕地水资源短缺指数

1999—2014 年中国年均 AWR 与 CWF 分别约为 2 539.8 与 1 041.7 Gm<sup>3</sup>, 因而形成的 AWSI 多年平均值为 0.413, 说明中国耕地上总体处于高度水资源压力状态, 面临较严重的水短缺。图 1 给出了历年 AWR、CWF 以及 AWSI 的全国值, 以判别中国农业广义水资源收支及水短缺状况随时间变化规律。

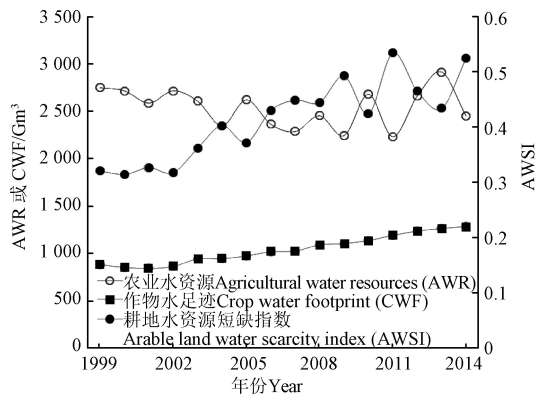


图 1 1999—2014 中国农业广义水资源收支及耕地水资源短缺指数

Fig.1 National generalized agricultural water resources balance and AWSI in 1999—2014

图 1 显示, 全国可用于农业生产的广义水资源量 AWR 在年际间呈小幅波动, 无明显的变化趋势, 各值介于 2 200~2 900 Gm<sup>3</sup>之间。这主要与历年气候条件、耕地面积总量、取水总量及用水组成等因素总体上的相对稳定有关。研究时段内, 全国耕地面积始终维持在  $1.27 \times 10^8 \text{ hm}^2$  左右; 水资源总量和农业用水量也分别在  $2.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$  和  $3 700 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右小幅变化。虽然初始出现回落现象, CWF 总体上呈随时间稳步增长的趋势。作物耗水和水生生产力变化不大的前提下, 农业生产规模的扩张和种植结构的改变是 CWF 稳步增长的主要驱动力。15 a 间, 农作物总播种面积由  $1.56 \times 10^8 \text{ hm}^2$  扩大到  $1.65 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 与此同时高耗水的粮食作物产量由约  $5.08 \times 10^8 \text{ t}$  增长到  $6.07 \times 10^8 \text{ t}$  左右。AWR 与 CWF 的数值及变化趋势共同决定 AWSI 的表现: 前 4 a 稳定在 0.320 左右并面临中度水资源压力, 2003 年之后持续上升, 2006

年超过 0.400 落入高度水资源压力区间并于 2011 年达到研究时段的峰值 0.534; 受全国水资源总量波动导致 AWR<sub>blue</sub> 年际变化加大的影响, 近 5 a AWSI 以 0.476 为均值出现较大幅度的波动, 不仅说明中国耕地水短缺加剧, 也揭示其不确定性在增强。

### 2.2 AWSI 的时空分布

图 2 为 AWSI 历年全局 Moran's *I* 及检验值 Z-Score。由图可以看出, Moran's *I* 在所有的年份均大于 0, 同时相应的 Z-Score 值大于显著水平为 0.01 时的临界值 (2.58)。说明中国耕地水资源短缺指数表现为正自相关关系, 相似值之间在空间上呈相互聚集的总体格局。AWSI 的决定因素涉及自然气候、水资源供需以及农业生产特征等与作物-水资源关系相联系的诸多方面。而以上各因素在时间上表现无突变现象的同时在地理上基本上均表现出临近区域的类似性<sup>[28-29]</sup>, 这应该是历年耕地水资源短缺指数在空间上呈聚集现象的主要原因。

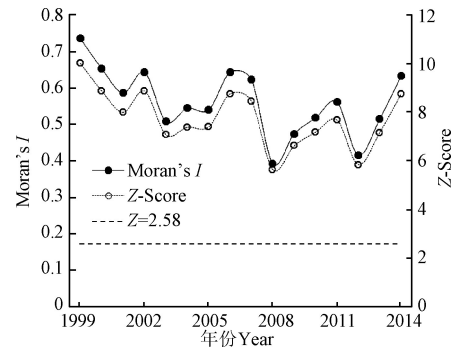


图 2 1999—2014 中国 AWSI 全局 Moran's *I* 指数及其检验  
Fig.2 Global Moran's *I* of AWSI and its test during 1999—2014

根据 AWSI 的空间分布图可以分别判别出较大值和较低值所具体聚集的区域。观察各年份空间分布状况发现, 虽然数值存在差异, 但是各省 AWSI 不同年份在全国相对大小基本稳定, 空间上的聚集特征在时间上未发现较大变化。因此给出 1999、2004、2009 及 2014 年 4 个年份的 AWSI 的空间分布图, 以观察其在空间上的分布和聚集特征, 如图 3 所示。同时, 计算出各省区 AWSI 的年际平均值、极差、标准差、年均变化率及变异系数等主要统计量, 为明晰省区耕地水资源短缺及其随时间变化情况, 结果列于表 3。

图 3 显示, 不同年份 AWSI 的总体空间分布格局与全局空间自相关的计算结果相符, 表现为明显而稳定的空间聚集现象。AWSI 较大省区聚集于黄淮海平原, 并随着时间推移有向西北和东北方向延伸的趋势; 青藏地区及其周边的西南省区是 AWSI 较低的区域; 长江右岸各省的耕地水短缺程度位于全国中间位置, 也呈现随时间恶化的趋势。AWSI 在局部空间的分布状况直接由水资源禀赋与农业生产规模决定, 这些条件在地理上聚集是形成各年份相似且局部聚集空间格局的原因。结合图 3 与表 2 来看, 山东省 1999—2014 年间的 AWSI 为 2.056, 居全国之首; 河北、宁夏、北京、河南、天津及上海的 AWSI 值也明显高于极高水资源压力阈值的

0.800；以上省区为中国耕地农业生产水资源利用最不可持续的区域。江苏与辽宁也属于极高水资源压力的范畴，农业生产用水过程面临较大挑战。10 个省区的 AWSI 介于 0.400~0.800 之间，面临高度水资源压力，这些省区分布在极高水资源压力区域的边缘；表现为低度水资源压力和中度水资源压力（ $0.100<AWSI<0.400$ ）

的省区均位于长江以南；青海和西藏历年均处于无水资源压力状态，AWSI 的年均值分别为 0.036 和 0.004。青海和西藏的可利用水资源量丰富，而由于农业生产规模小农作物水足迹总量较小，因而耕地水资源短缺指数低。如，西藏 AWR 的年均值接近 400 Gm<sup>3</sup>，而 CWF 的年均值不足 2.00 Gm<sup>3</sup>。

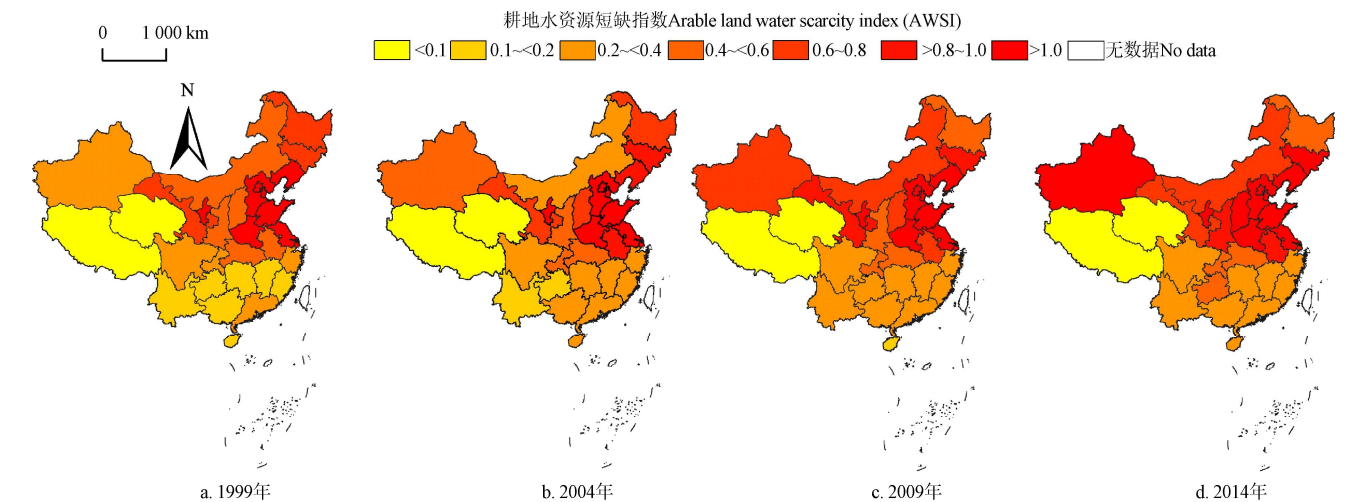


图 3 典型年份耕地水资源短缺指数 AWSI 的空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of AWSI in selected years

表 3 各省区 AWSI 在 1999—2014 年间 AWSI 的主要统计量  
Table 3 Provincial statistics of AWSI during 1999—2014

区域 Region	年均值 Annual mean	极差 Range	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	年均变化率 Change rate/%
山东 Shandong	2.056	1.380	0.390	0.190	5.0
河北 Hebei	1.978	1.279	0.297	0.150	3.7
宁夏 Ningxia	1.833	1.597	0.635	0.347	3.1
北京 Beijing	1.791	1.170	0.361	0.201	0.4
河南 Henan	1.766	1.434	0.462	0.262	5.9
天津 Tianjin	1.462	0.981	0.254	0.174	3.5
上海 Shanghai	1.381	0.893	0.269	0.194	3.3
江苏 Jiangsu	1.052	0.538	0.125	0.119	2.2
辽宁 Liaoning	0.967	0.854	0.218	0.225	8.6
吉林 Jilin	0.731	0.559	0.144	0.196	6.0
山西 Shanxi	0.709	0.696	0.206	0.291	7.6
甘肃 Gansu	0.708	0.329	0.109	0.154	3.2
安徽 Anhui	0.705	0.363	0.111	0.158	5.9
内蒙古 Neimenggu	0.634	0.504	0.169	0.266	5.7
黑龙江 Heilongjiang	0.599	0.567	0.149	0.249	6.3
陕西 Shaanxi	0.566	0.529	0.150	0.266	6.5
湖北 Hubei	0.506	0.339	0.092	0.182	4.9
重庆 Chongqing	0.483	0.231	0.067	0.139	3.6
新疆 Xinjiang	0.472	0.822	0.240	0.508	26.9
浙江 Zhejiang	0.313	0.303	0.079	0.254	10.5
湖南 Hunan	0.270	0.293	0.066	0.246	7.0
四川 Sichuan	0.267	0.126	0.035	0.132	2.7
广西 Guangxi	0.250	0.247	0.070	0.280	7.1
广东 Guangdong	0.246	0.184	0.051	0.208	5.7
福建 Fujian	0.242	0.234	0.074	0.305	11.1
贵州 Guizhou	0.210	0.265	0.060	0.284	8.9
江西 Jiangxi	0.195	0.173	0.050	0.255	10.7
海南 Hainan	0.181	0.199	0.058	0.320	10.0
云南 Yunnan	0.171	0.161	0.052	0.305	10.2
青海 Qinghai	0.036	0.037	0.008	0.227	5.0
西藏 Xizang	0.004	0.001	0.000	0.063	0.2
中国 China	0.413	0.220	0.070	0.169	4.0

不同年份间的变化方面, 极差与标准差的空间分布与耕地水资源短缺指数相似, 基本上表现为 AWSI 值越大的省区年际间绝对变化越大, 山东、河北、宁夏、北京与河南的极差超过 1.000, 而青海与西藏低于 0.100; 西藏标准差几乎为 0, 与年均值、极差共同揭示该区不仅 AWSI 低, 且在年际间维持稳定; 其他省区间标准差介于 0.008 (青海)~0.635 (宁夏) 之间, 差异较大; 省区间的 AWSI 值及其年际间绝对变化较大, 然而除西藏与宁夏外, 变异系数基本上介于 0.100~0.300 之间, 年际间相对变化较为接近。西藏与宁夏的 AWSI 表现不同于其他大部分省区主要是由其水资源和农业生产特征决定的。虽然耕地上的有效降水量不足 400 mm, 但由于河川径流量大, 西藏的年均 AWR 达到了 400 Gm<sup>3</sup>, 为所有省区之最; 然而由于农业生产规模小, 西藏年均 CWF 仅为 1.55 Gm<sup>3</sup>, 全国最小; 历年 CWF 占 AWR 的比例均极小, 这也是 AWSI 小且波动微弱的原因。宁夏的降水稀少与农业水资源缺口大而造成严重的耕地水资源短缺, 同时, AWR 的年际变化和 CWF 的大幅增长共同决定了 AWSI 的年际间的变异系数最大。表 3 还显示, 所有省区 AWSI 整体上均呈随时间增大的趋势, 说明近 15 a 中国耕地水短缺全面加剧, 农业用水效率提升是当前面临重要需求。由农业生产规模扩张导致的农作物水足迹增大 (图 1) 是 AWSI 随时间增长的主要原动力。大部分省区 AWSI 的年均增长率不超过 10.0%, 新疆的增速达到了 26.9%, 明显高于其他省区。新疆 AWR 保持在 100 Gm<sup>3</sup>, 无明显变化趋势, 而 CWF 由 21.51 Gm<sup>3</sup>一路上升到 2014 年的 75.75 Gm<sup>3</sup>。这也使得新疆由低度~中度水短资源压力地区转换为高度~极高水资源压力地区。

2.3 AWSI 驱动要素解析

利用 PLSR 对 AWSI 的主控因子判别的结果见表 4、图 4 及图 5。表 4 所示, PLSR 模型提取出的 2 个偏最小二乘回归主成分分别解释 ASWI 空间变异的 58.9%和 13.8%, 而增加更多成分到 ASWI 偏最小二乘回归模型中, 未能提高对 ASWI 空间变异的贡献率。图 4 显示, 第 1 成分中农业机械总动力 (MP) 对 ASWI 大小有正作用, 降水量 (P) 对 ASWI 大小呈负作用。第 2 成分中粮食面积比例 (GA) 对 ASWI 大小有正向影响, 日照时数 (SH) 对 ASWI 有负向影响, 表现为不显著。

表 4 ASWI 的 PLSR 模型  
Table 4 PLSR model of ASWI

成分 Component	AWSI 变异性 解释的百分比 Percent of explained variability in AWSI/%	AWSI 变异性解 释的累积百分比 Cumulative explained variability in AWSI/%	$Q_{cum}^2$	$R^2$	$Q$
1	58.9	58.9	0.511	0.73	0.53
2	13.8	72.7	0.533		

一般情况下, VIP 值在 1 之上的变量为因变量的重要影响因素。AWSI 的 PLSR 模型中 (图 5) 3 个变量的 VIP 值大于 1, 分别为农业机械总动力 (MP, VIP=1.761, 回归系数=0.457), 降水量 (P, VIP=1.192, 回归系数

=-0.312), 人均 GDP (GP, VIP=1.170, 回归系数=0.030)。其中农业机械总动力和人均 GDP 的增大会导致 ASWI 增大, 降水量则和 ASWI 呈显著负相关。与此相对, VIP 较小的因素包括相对湿度 (RH, VIP=0.729)、平均气温 (AT, VIP=0.321)、地均化肥 (CF, VIP=0.822) 及地均农药 (PP, VIP=0.458)。

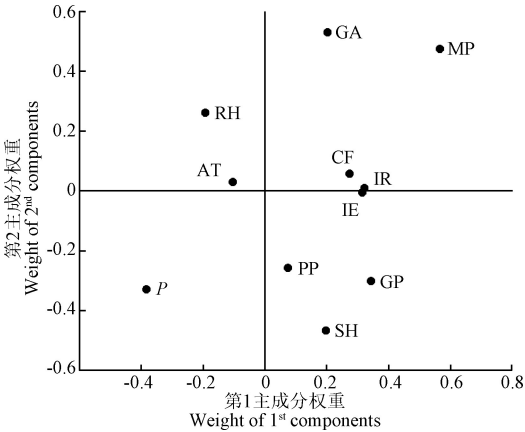


图 4 AWSI 偏最小二乘模型第一、二成分权重  
Fig.4 Weight of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> PLSR components for AWSI

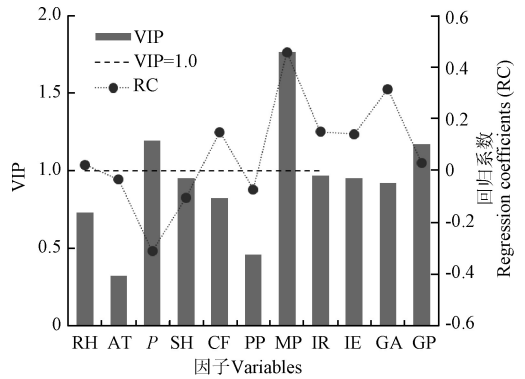


图 5 ASWI 偏最小二乘模型中各因子变量投影重要性指标 VIP 及回归系数

Fig.5 Variable importance for projection (VIP) and regression coefficients (RC) for each predictor of ASWI

降水量为与农作物类型和水资源禀赋的空间分布有直接联系的气象因子。中国的降水量大体呈现东南向西北递减的空间格局, 而日照时数正好基本相反。降水量与区域农业广义水资源密不可分, 其直接决定耕地可利用绿水资源的同时很大程度上影响蓝水资源的丰欠。农业机械总动力、粮食面积比重以及人均 GDP 均为能综合反映区域农业生产条件与用水水平的社会经济因子。农业机械总动力最主要部分体现于农田耕作机械和灌排机械, 二者分别对区域农业用水状况紧密相连的同时影响区域的耕地水短缺状况。耕作机械动力投入量较大的区域大多土地肥沃平整、农业基础设施完善, 如位于水资源相对匮乏地区的华北平原; 由于主要作物生育期降水有限, 这些地区农业生产对灌溉水及灌排机械的需求较大, 如华北各省市农业机械总动力高达 10 kW/hm<sup>2</sup>, 而长江流域粮食主产区仅为 3 kW/hm<sup>2</sup> 左右; 农业机械投入和

农业生产效率的提高会促使灌溉面积和农业生产规模的扩大,从而形成更大的农作物水足迹和更严峻的耕地水短缺。由于粮食作物耗水量和单位面积水足迹值均高于其他作物,粮食面积比重较大省区农作物水足迹总量也趋于较大,进而导致耕地水资源短缺指数的增大。人均 GDP 衡量区域经济发展程度也侧面反映行业用水结构并影响耕地的水短缺状况:由于工业和服务业发展水平和水资源需求均较高,人均 GDP 越大的省区农业用水比例相对低,这会造成当地分配于农业领域的可利用水资源量较小,进而增大耕地水资源短缺指数。气象要素相对湿度(RH)与平均气温(AT)虽影响作物耗水过程和蓝绿水足迹,但是与作物灰水足迹以及 AWR 无直接关联,这可能是二者 VIP 值较低的原因。农业生产投入地均化肥(CH)及地均农药(PP)在区域间的差别不如其他社会经济因子明显,且当前灰水足迹估算过程中难以考虑区域间化肥有效利用程度的差别。这是他们在空间上对 AWSI 的影响相对较小主要原因。此外,土壤特性对于作物生产水足迹相关,从而可能成为 AWSI 的驱动要素。因数据来源缺陷,该要素在 PLSR 分析未予考虑,这是未来区域农业水资源短缺驱动机制分析中需要注意的问题。

### 3 结 论

1) 水足迹视角下,耕地水资源短缺指数(arable land water scarcity index, AWSI)能够全面量化区域广义水资源可持续利用程度。15 a 间全国 AWSI 为 0.413,农业生产领域一直处于随时间加剧趋势的高度水资源压力状态,将持续面临严峻的资源 and 环境两方面导致的水短缺。

2) 耕地水资源短缺指数同时存在时间和空间上的不平衡性,华北平原是耕地水短缺问题最为严重的区域,长江以南和东北的粮食主产区也面临中度以上水资源压力,西北旱区的耕地水短缺加剧趋势最为明显。

3) 降水是对 AWSI 影响最为明显的气象因子,而农业机械总动力、粮食面积比例以及人均 GDP 对 AWSI 表现出了较明显的影响。在经济发展和农业生产水平较高的粮食主产区应基于全区域的农产品产出保障和水足迹总量控制来进行农业水资源管理策略制定,以实现水资源的可持续利用。

#### [参 考 文 献]

- [1] 姜秋香,周智美,王子龙,等. 基于水土资源耦合的水资源短缺风险评价及优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 136—143.  
Jiang Qiuxiang, Zhou Zhimei, Wang Zilong, et al. Risk assessment and optimization of water resources shortage based on water and land resources coupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 136—143. (in Chinese with English abstract)
- [2] Cao X, Wu M, Zheng Y, et al. Can China achieve food security through the development of irrigation?[J]. Regional Environmental Change, 2018, 18(2): 465—475.
- [3] Velasco M, Aznar S, Belmonte U, et al. Advances in water use efficiency in agriculture: A bibliometric analysis[J]. Water, 2018, 10(4): 377.
- [4] Wang Y, Zhang Y, Zhang R, et al. Reduced irrigation

- increases the water use efficiency and productivity of winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 112—120.
- [5] 李慧,周维博,庄妍,等. 延安市农业水土资源匹配及承载力[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 156—162.  
Li Hui, Zhou Weibo, Zhuang Yan, et al. Agricultural water and soil resources matching patterns and carrying capacity in Yan'an City[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 156—162. (in Chinese with English abstract)
- [6] Pedro M, Solera A, Ferrer J, et al. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 482—493.
- [7] Li J, Liu Z, He C, et al. Water shortages raised a legitimate concern over the sustainable development of the drylands of northern China: Evidence from the water stress index[J]. Science of The Total Environment, 2017, 590: 739—750.
- [8] Sun S, Wang Y, Engel B, et al. Effects of virtual water flow on regional water resource stress: A case study of grain in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 871—879.
- [9] Hoekstra A. Water footprint assessment: Evolvement of a new research field[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3061—3081.
- [10] Xinchun C, Mengyang W, Rui S, et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610: 84—93.
- [11] Chu Y, Shen Y, Yuan Z. Water footprint of crop production for different crop structures in the Hebei southern plain, North China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(6): 3061—3069.
- [12] Zhang Y, Huang K, Yu Y, et al. Mapping of water footprint research: A bibliometric analysis during 2006—2015[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 70—79.
- [13] Chukalla A, Krol M, Hoekstra A. Grey water footprint reduction in irrigated crop production: Effect of nitrogen application rate, nitrogen form, tillage practice and irrigation strategy[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(6): 3245—3259.
- [14] Dambrosio E, Degirolamo A M, Rulli M C. Assessing sustainability of agriculture through water footprint analysis and in-stream monitoring activities[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200: 454—470.
- [15] Zhuo L, Mekonnen M, Hoekstra A, et al. Inter-and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961—2009)[J]. Advances in Water Resources, 2016, 87: 29—41.
- [16] Veettil A, Mishra A. Water security assessment using blue and green water footprint concepts[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 589—602.
- [17] 操信春,任杰,吴梦洋,等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 1—8.  
Cao Xinchun, Ren Jie, Wu Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(5): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [18] Liu J, Liu Q, Yang H. Assessing water scarcity by simultaneously considering environmental flow requirements, water quantity, and water quality[J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 434—441.
- [19] Cao X, Huang X, Huang H, et al. Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: A study of Jiangsu Province, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 95: 444—454.
- [20] 操信春,邵光成,王小军,等. 中国农业广义水资源利用



- 系数及时空格局分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 14—21.
- Cao Xinchun, Shao Guangcheng, Wang Xiaojun, et al. Generalized water efficiency and strategic implications for food security and water management: A case study of grain production in China[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(1): 14—21. (in Chinese with English abstract)
- [21] Raskin P, Gleick P, Kirshen P, et al. *Water Futures: Assessment of long-range patterns and prospects*[R]. Stockholm, Sweden: Stockholm Environment Institute, 1997.
- [22] Munia H, Guillaume J, Mirumachi N, et al. Water stress in global transboundary river basins: Significance of upstream water use on downstream stress[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 1(1): 014002.
- [23] Xinchun C, Mengyang W, Xiangping G, et al. Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 587—597.
- [24] Xia J, Wang L, Yu J, et al. Impact of environmental factors on water quality at multiple spatial scales and its spatial variation in Huai River Basin, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(1): 82—92.
- [25] Ye X, Wu Z, Wang Z, et al. Seasonal prediction of the Yangtze River runoff using a partial least squares regression Model[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2018, 56(2): 117—128.
- [26] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.
- [27] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [28] 孙才志, 陈丽新, 刘玉玉. 中国农作物绿水占用指数估算及时空差异分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 637—643. Sun Caizhi, Chen Lixin, Liu Yuyu. Spatial and temporal variation of crops green water occupancy index in China[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 637—643. (in Chinese with English abstract)
- [29] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区水分生产率及其时空差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 1—7. Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Analysis on temporal and spatial differences of water productivity in irrigation districts in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(13): 1—7. (in Chinese with English abstract)

## Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective

Cao Xinchun<sup>1,2</sup>, Liu Zhe<sup>2</sup>, Wu Mengyang<sup>2</sup>, Guo Xiangping<sup>2</sup>, Wang Weiguang<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Efficient water use in agriculture production system is widely accepted as an important foundation of regional water resources management, water shortage alleviation and environmental sustainability. The arable land water scarcity index (AWSI) to describe relationship between crop production and potentially water resources was established based on water footprint framework in current study. AWSI was defined as the ratio of total water footprint in regional crops cultivation to available agricultural water resources, including blue and green water. AWSI in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China from 1999 to 2014 was calculated. Then, the spatial-temporal pattern and driving mechanism in the observed period were explored with the help of the methods of spatial autocorrelation analysis. A total of 10 potential factors such as relative humidity (RH), average temperature (AT), precipitation ( $P$ ), sunshine hours (SH), chemical fertilizer per area (CF), pesticides per area (PP), power of machinery per area (MP), irrigation rate (IR), irrigation efficiency (IE), proportion of grain area (GA) and per capita GDP (GP) were selected in driving mechanism assessment. Given that the high co-dependence of these potential factors, partial least squares regression (PLSR) was used to elucidate the linkages between the ASWI and the selected factors. The results showed that, annual value of AWSI in China was estimated about 0.413, and the country faced high water stress during the studied period; AWSI in almost all of the provinces, municipalities and autonomous regions increased over time, indicating that water scarcity in agricultural production system of China was intensifying. Spatial autocorrelation analysis showed that the global Moran's  $I$  was higher than 0 in all the calculated years, implying provinces, municipalities and autonomous regions with similar AWSI presented an obvious aggregation characteristic in agriculture production of China. Provinces with high AWSI was in the North China Plain and all the regions facing extremely high water stress ( $\text{AWSI} > 0.800$ ) were distributed in the north of China; most of the provinces located in south of the Yangtze River were classified as moderate water stress ( $0.100 < \text{AWSI} < 0.400$ ); and with a value of AWSI below 0.100, only the Qinghai and Tibet were in the provinces and autonomous regions with no water stress. The controlling factors for ASWI were identified by calculating the variable importance for the projection (VIP) in PLSR model. PLSR revealed that the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> components could explain 58.9% and 13.8% of the variation in the ASWI. The dominant 1-order factors affecting the changes in sediment yield in our study were: MP (with VIP and regression coefficient (RC) were 1.761 and 0.457, respectively),  $P$  (with the VIP and RC were 1.192 and -0.312, respectively) and GDP (with the VIP and RC were 1.170 and 0.030, respectively). The development of social economy was an important reason for provincial water scarcity intensification in agricultural production of China. The PLSR approach proposed in this paper was useful in that it eliminated the interdependence between variables to some extent and quantitatively calculated contribution of driving factors to changes in ASWI. The evaluation of water scarcity in arable land and the results of current study can be used for decision-making in agricultural water use efficiency improvement and total water appropriation control.

**Keywords:** water resources; partial least-squares regression (PLSR); agriculture; efficient water use; blue and green water; grey water footprint; evaluating indicator