

水分生产率指标的时空差异及相关关系

操信春^{1,2}, 吴普特^{2,3}, 王玉宝^{1,2}, 赵西宁^{2,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;
3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为从不同视角揭示农业水资源利用与粮食生产的关系, 分析了我国灌区毛入流量水分生产率(P_{wg})、毛灌水量水分生产率(P_{wl})、蒸散量水分生产率(P_{wET})及广义水资源利用量水分生产率(P_{wu})的时空差异及指标间的相关性。结果显示: 全国4个指标分别为 0.694 kg/m^3 、 1.361 kg/m^3 、 1.314 kg/m^3 及 0.860 kg/m^3 , 各省灌区水分生产率总体上均呈增大趋势; 不同年份各指标空间分布格局基本相似, 均表现为黄淮海平原及其周边省区较大, 东北、长江以南和西北部分省区较小; 省际水分生产率差距有扩大迹象, 各指标空间差异程度大小关系为 $P_{wl} > P_{wET} > P_{wu} > P_{wg}$; 两两指标间显著线性相关, P_{wu} 与其他指标的相关系数大于 0.950。4个指标在科学内涵和数值表现上存在较大差异, 但均可用于表征省级尺度粮食水分生产率的空间差异。

关键词: 水分生产率; 指标; 粮食; 灌溉; 空间分布

中图分类号: S271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2014)02-0268-07

农业的高效用水是实现粮食安全、水资源安全以及生态环境安全的重要支撑, 合理评价水资源利用与农业生产之间的关系一直是研究的热点^[1]。农业生产用水效益大致经历了由针对灌溉过程、注重灌溉水有效利用的“灌溉效率”评价^[2-3]向基于广义水资源及水量平衡观点、考虑农业产出的“水分生产率”评价^[4-6]的转变。衡量农业水分生产率指标众多, 不同研究角度及目的下建立的指标均有一定的科学含义及指导意义, 所以不同研究体系还没有形成统一的评价标准。当前关于农业水分生产率的研究主要为典型区域(灌区)不同尺度或不同类型指标的比较和大尺度上(全球或国家)某单一指标的评估。学者利用田间实测数据结合水文模型、遥感等手段分别对不同区域水分生产率进行量化并探寻其随尺度的变化规律^[7-9]; Liu等^[10]和Zwart等^[11]在借助GIS等工具的基础上利用GEPIC、WATPRO模型对全球尺度的主要作物水分生产率进行了评估; 通过对农田蒸散量、灌溉水量、广义水资源利用量等参数的估算, Yuan等^[12]、操信春等^[13]、Tao和Zhang^[14]对中国粮食作物不同水分生产率指标及其时空分布进行了比较研究。宏观上统一方法和数据来源下不同指标间量化与比较分析的研究较少。此外, 不同水分生产率评价指标对资源利用关注的角度不同, 数据获取和计算难度也有差异, 选择代表性的指标来表征农业水资源利用效益可为获取主要信息并减少工作量提供便利。本文从水分生产率的含义及我国灌区粮食生产用水入手, 通过水分投入项的改变建立不同指标, 分析水分生产率的时空变化态势和指标间的关系, 为相关科学研究和宏观政策的制定提供参考。

1 方法与材料

1.1 指标计算

粮食水分生产率可定义为单位水资源投入所能生产的农作物的经济产量, 对于不同空间尺度或研究需要, 水分生产率指标的计算方法存在差异, 但均可表现为以下基本形式:

收稿日期: 2013-05-24; 网络出版时间: 2014-02-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140226.1355.013.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B09); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)

作者简介: 操信春(1986—), 男, 江西鄱阳人, 博士研究生, 主要从事农业水土资源管理研究。E-mail: cxcsci@sina.cn

通信作者: 吴普特, E-mail: Gjzwpt@vip.sina.com

$$P_w = Y/W \quad (1)$$

式中 P_w 为水分生产率, kg/m^3 ; Y 为平均单位耕地面积粮食产量, 可由粮食单产与复种指数的乘积来计算, kg/hm^2 ; W 为水资源投入量, m^3/hm^2 。

分别采用毛入流量(降水量+毛灌水量)、毛灌水量、田间蒸散量(有效降水量+灌溉水利用系数 \times 毛灌水量)及广义水资源利用量(有效降水量+毛灌水量)作为式(1)中的水分投入, 定义毛入流量水分生产率(P_{wg})、毛灌水量(灌溉)水分生产率(P_{wl})、蒸散量水分生产率(P_{wET})和广义水资源利用水分生产率(P_{wu})。其中, 有效降水量以旬为步长, 采用如下方法计算^[15]:

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.02P)/4.17 & P < 83 \\ 41.7 + 0.1P & P \geq 83 \end{cases} \quad (2)$$

式中 P 和 P_e 分别为旬降水量和旬有效降水量, mm 。

1.2 数据收集与处理

选择了全国 443 个典型灌区(涵盖了各省所有大型灌区, 见图 1)为基本数据获取和处理单元。省级尺度的水分生产率由该省内各灌区的计算结果通过对灌区有效灌溉面积加权得到。

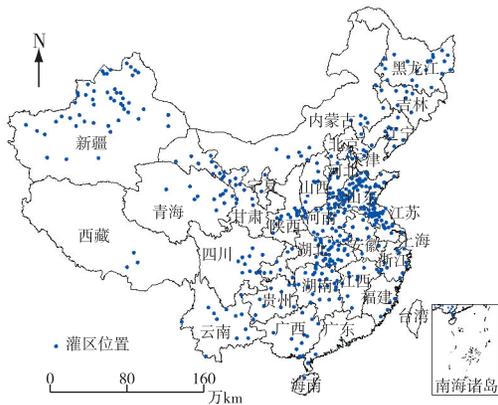


图 1 所选灌区分布

Fig. 1 Distribution map of 443 large irrigation districts

$$P_w = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{wi} S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (3)$$

式中 P_w 为一省灌区水分生产率; i 为省内灌区个数; P_{wi} 、 S_i 分别为省内第 i 个灌区的水分生产率和有效灌溉面积。各指标全国值以省为单元, 利用同样的方法计算得到。受数据限制, 本文选取 1998 年、2005 年及 2010 年为代表年, 计算和分析中国及各省灌区的粮食水分生产率。

所选灌区代表年的旬降水量来源于中国气象科学数据共享服务网(cdc.cma.gov.cn), 与灌区所在行政区的气象站点对应; 灌区代表年的灌溉用水量、粮食单产、复种指数、灌溉水利用系数、灌溉面积等数据来源于 2010 年底“全国大型灌区续建配套与节水改造项目总结”中各灌区总结报告对该灌区基本情况统计, 统一由中国灌溉排水发展

中心提供, 此外, 还少量来自中国大型灌区网站(www.dxxgq.org.cn)及部分灌区管理局; 全国 180 个农业观测站点的主要粮食生育期数据由水利部灌溉试验总站提供, 另外一部分源于实地参与式调查和文献资料; 尚参考了 1998—2011 年中国及各地区水资源公报、《中国水利年鉴》以及《中国统计年鉴》等资料。

2 结果与分析

2.1 中国灌区水分生产率

全国灌区不同水分生产率指标在 3 个代表年的表现列于图 2。 P_{wg} 、 P_{wl} 、 P_{wET} 及 P_{wu} 代表年均值分别为 $0.694 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $1.361 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $1.314 \text{ kg}/\text{m}^3$ 及 $0.860 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。 P_{wl} 与 P_{wET} 的值总体上接近, 即中国灌区引水中因损失掉而不能蒸散于农田的水量与降水中共作物有效利用的水量相近, 也说明了降水资源(绿水)在粮食生产中的重要作用。

图 2 显示, 各水分生产效率指标均呈随时间增长态势, 这说明生产单位质量的粮食在各个角度所需投入的水资源量在不断减少。这一方面与中国粮食单产水平的提高密切相关,

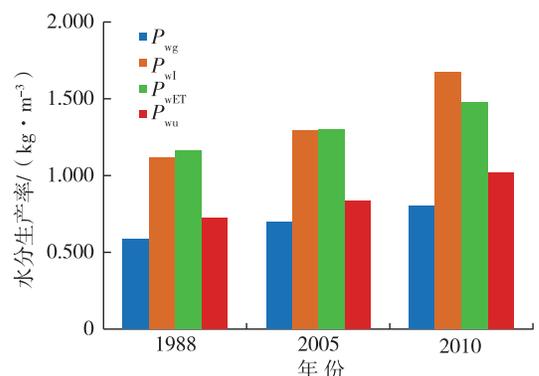


图 2 代表年中国灌区的水分生产率

Fig. 2 Four P indicators in irrigated land of China in typical years

另一方面也因为灌区灌溉工程的改造使得灌溉水有效利用率增大从而减少了灌溉引水量。各指标间的增加幅度存在差异, P_{wl} 增长较快, 2010 年在 1998 年的基础上增长了 49.8%; 1998 年中国灌区的平均灌水量为 $8\ 880\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 对应耕地上的粮食产出为 $9\ 914\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 2010 年这两个参数分别变化为 $7\ 273\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 及 $12\ 159\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 从而使得 P_{wl} 大幅度地提升。2010 年的 P_{wg} 与 P_{wu} 在 1998 年基础上分别增加了 37.6% 和 40.6%, 稍小于 P_{wl} ; 由于主要受单产变化的影响而作物耗水的变化不显著, P_{wET} 的变化最小。

2.2 水分生产率指标的时空差异

2.2.1 各省灌区各指标随时间变化

为分析各个省区的水分生产率指标的变化情况并对比变化幅度的空间差异, 计算出了不同省区各指标的年均变化率, 见表 1(按 4 个指标年均变化率的平均值从大到小排列)。

表 1 各省灌区水分生产率的年均变化率

%

Table 1 Provincial annual average change rate of each indicator in 1998—2010

区 域	P_{wg}	P_{wl}	P_{wET}	P_{wu}	区 域	P_{wg}	P_{wl}	P_{wET}	P_{wu}	区 域	P_{wg}	P_{wl}	P_{wET}	P_{wu}
上 海	5.3	7.0	6.6	5.7	陕 西	3.5	5.6	2.4	3.5	浙 江	2.0	4.4	1.3	2.5
重 庆	6.8	6.6	4.8	5.9	甘 肃	4.0	4.7	2.4	3.8	青 海	3.0	4.1	0.2	3.0
北 京	6.8	6.4	4.9	5.9	云 南	4.0	4.2	2.8	3.6	河 南	2.6	3.4	1.2	2.2
内 蒙 古	5.6	5.4	5.6	5.7	河 北	4.1	5.0	1.8	3.5	安 徽	-0.7	0.9	4.9	3.5
湖 北	3.9	6.7	3.1	4.3	山 东	3.5	4.1	2.5	3.4	湖 南	2.8	2.5	1.2	1.9
天 津	5.4	4.5	2.6	4.3	贵 州	2.7	4.4	2.2	3.6	福 建	2.0	4.1	-0.2	2.1
吉 林	4.7	5.2	2.5	4.3	广 东	2.8	4.5	2.0	3.1	辽 宁	1.5	3.1	0.5	1.9
黑 龙 江	4.4	4.6	2.7	3.9	江 苏	3.3	3.2	2.2	3.0	江 西	1.1	3.0	0.4	1.6
山 西	5.5	4.7	2.0	3.4	广 西	3.5	3.3	1.8	3.0	海 南	0.4	3.0	0.3	2.1
四 川	3.8	4.9	3.0	3.8	宁 夏	2.9	2.6	2.5	2.7	中 国	2.9	3.8	2.1	3.1
西 藏	5.0	5.1	1.4	3.7	新 疆	2.7	3.3	1.6	2.7					

表 1 显示, 除安徽的 P_{wg} 和福建的 P_{wET} 外, 各省 4 个水分生产率指标值均呈增加趋势。但是省区间变化速率的差异较大, 重庆、北京的 P_{wg} 年均增幅达 6.8%, 安徽、海南则没有明显变化; P_{wl} 和 P_{wu} 的年均变化率分别为 0.9%~7.0% 及 1.6%~5.9%; P_{wET} 在上海以年均 6.6% 的速率增加, 而在青海、福建等诸多省区的变化率不足 1.0%。总的来说, 水分生产率增长较快的省区主要分为两大类: 一类为直辖市, 包括上海、北京、重庆及天津, 虽然粮食生产规模小, 但这些地区经济发展速度较快且程度较高, 具有对农业生产技术和田间管理措施的改善进行较大投入的能力; 另一部分主要为东北的粮食主产区, 如黑龙江、吉林及内蒙古, 这些省区是近年国家粮食生产格局调整中的新兴粮食主产区和输出大省, 粮食生产任务增大, 单产水平也不断提高, 从而使得水分生产率增长较快。安徽、湖南、福建、江西及海南等南方省份水分生产率指标的变化均不明显, 这主要由于这些省份都位于水资源较丰富的区域, 促使了灌溉方式的粗放而忽略了对灌溉水合理利用的重视, 也可能由中部省份的经济发展相对滞后, 对农业生产、灌溉工程及田间管理措施的投入薄弱决定^[13]。

2.2.2 水分生产率指标的空间分布

表 2 给出了不同年份及各水分生产率指标省区间的最大值、最小值、极差及标准差等统计量, 以对比不同指标的空间分散程度及其随时间变化情况。同时, 由于 4 个指标在各代表年的空间分布格局的一致性较好, 故用各个指标在 3 个年份的平均值分析水分生产率空间格局, 见图 3。

从表 2 可看出, 极差、标准差在各指标间的大小关系均为 $P_{wl} > P_{wET} > P_{wu} > P_{wg}$, 省区间毛灌水量的离散程度最大, 而毛入流量最小; 各个指标的极差和标准差均随时间增加, 表明中国灌区水分生产率的空间差异在不断扩大。

表 2 各水分生产率指标的主要统计量

Table 2 Main statistics of four P_w indicators in typical years

指标	年份	最大值	最小值	极差	标准差	指标	年份	最大值	最小值	极差	标准差
P_{wg}	1998	1.030	0.268	0.762	0.202	P_{wET}	1998	2.296	0.608	1.688	0.416
	2005	1.179	0.348	0.831	0.259		2005	2.044	0.639	1.405	0.428
	2010	1.588	0.262	1.326	0.338		2010	2.718	0.647	2.071	0.533
	均值	1.266	0.294	0.972	0.260		均值	2.353	0.647	1.706	0.444
P_{wl}	1998	2.209	0.414	1.795	0.538	P_{wu}	1998	1.290	0.330	0.960	0.280
	2005	2.632	0.491	2.140	0.633		2005	1.376	0.386	0.991	0.296
	2010	3.671	0.604	3.066	0.912		2010	1.842	0.410	1.432	0.412
	均值	2.754	0.545	2.209	0.687		均值	1.483	0.391	1.093	0.325

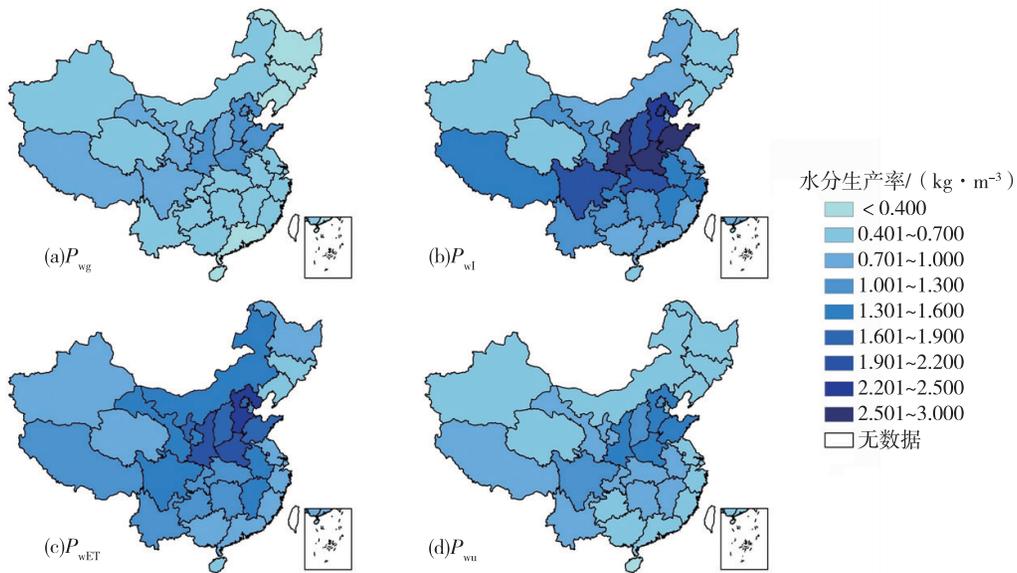


图 3 不同水分生产率指标的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water productivity indexes in China

图 3 显示, 4 个水分生产率指标的空间分布格局基本相同, 均表现为黄淮海平原及其周边省区较大而位于华南、东南、东北及西北的部分省区较小。结合表 2 与图 3 具体来看, 河北的 P_{wg} 全国最大, 为 1.266 kg/m^3 , 陕西、北京、山东、河南也均在 1.000 kg/m^3 以上, 属于毛入流量水分生产率较高的省区, 海南为唯一 P_{wg} 不足 0.300 kg/m^3 的省份; 陕西、山东和河南的 P_{wl} 以 2.754 kg/m^3 、 2.712 kg/m^3 及 2.607 kg/m^3 位居全国前三, 海南、黑龙江、辽宁及吉林较小, 均在 0.600 以下; 河北与陕西的 P_{wET} 在 2.000 kg/m^3 以上, 河南、山东、宁夏、山西及北京在 $1.600 \sim 2.000 \text{ kg/m}^3$ 之间, 江苏、新疆等 12 省区不足 1.000 kg/m^3 , 其中辽宁最小, 为 0.647 kg/m^3 ; P_{wu} 分布方面, 陕西、河北、山东和河南亦位居全国前列, 均超过了 1.350 kg/m^3 , 6 个省区小于 0.500 kg/m^3 , 其中海南不足 0.400 kg/m^3 。综合 4 个指标, 河北、陕西、河南、山东及北京的水分生产率最高, 江西、四川在南方占优势, 海南、青海、黑龙江、辽宁和吉林则处于最末位置。

自然气候条件、作物种类、农业生产模式、灌溉工程保障程度及管理水平等因素综合影响着区域的水分生产率: 陕西关中地区和黄淮海平原各省以小麦、玉米轮作为主, 是中国传统的粮食产出区, 地势平坦、土地肥沃, 作物单产水平高, 与此同时, 水资源短缺状况制约着灌溉用水的投入, 这些地区单位耕地面积上对应的粮食产量达 12000 kg/hm^2 以上, 粮食生育期降水量约 700 mm , 人均水资源占有量不足 400 m^3 , 平均灌溉水量在 $4500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 左右, 故水分生产率全国最高; 降水量及水资源丰富、经济相对发达的华南及东南各省

以种植高耗水的稻谷为主,为“水稻灌溉区”,虽然可供作物生长的降水较多,但仍需对水稻进行灌溉,如福建、广西和海南 2010 年的灌溉引水量在 $15\ 000\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 以上,加上农业生产管理粗放使得灌溉引水量大同时浪费大,这是各水分生产率指标均低的原因所在;东北黑龙江、辽宁和吉林也种植了大量的水稻,虽然粮食单产水平较高,但因无霜期较短、复种指数仅为 1,单位耕地面积上的粮食产出有限,同时,该地区粮食生育期的总降水量和有效降水量分别约为 $600\ \text{mm}$ 及 $400\ \text{mm}$,灌溉引水量达 $14\ 000\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,加上灌溉水利用系数不高,所以水分生产率还有很大的提升空间;作为传统的农业大省和粮食主产区,四川和江西虽水资源投入较多,但粮食单产也较大,水分生产率高于南方其他省区亦大体与实际相符。

2.3 不同指标间的相关关系

各水分生产率评价指标均能在一定程度上反映区域水资源投入与粮食产出之间的定量关系。在进行全国尺度上的空间比较时,往往由于计算难度大而不能对各指标进行全面的对比与分析。为此,对省级尺度 3 个代表年水分生产率指标之间进行了皮尔逊相关分析,结果如表 3 所示。

表 3 不同年份指标间的相关系数 R

Table 3 Pearson's correlation coefficient (R) among indicators

指标	1998			2005			2010		
	P_{wl}	P_{wET}	P_{wu}	P_{wl}	P_{wET}	P_{wu}	P_{wl}	P_{wET}	P_{wu}
P_{wg}	0.875**	0.969**	0.970**	0.850**	0.917**	0.957**	0.853**	0.929**	0.946**
P_{wl}		0.853**	0.958**		0.752**	0.944**		0.859**	0.951**
P_{wET}			0.956**			0.905**			0.962**

不同年份 P_{wg} 、 P_{wl} 、 P_{wET} 及 P_{wu} 的两两之间均呈现较好的线性相关关系,各相关性均通过了 $P=0.01$ 的显著性检验。说明各指标在全国的排名次序基本相似,即任一指标均可大致衡量全国灌区上水分生产率的空间分布格局。然而,从相关系数 R 看,不同指标间的相关程度存在差异,如 2005 年 $P_{\text{wl}} \sim P_{\text{wET}}$ 的相关系数仅为 0.752,而 $P_{\text{wg}} \sim P_{\text{wu}}$ 在 1998 年达 0.970。总体来看, P_{wu} 与其他 3 个指标之间的相关性最好,当 P_{wu} 出现时相关系数的平均值为 0.950,显著大于其他指标。所以,在进行空间水分生产率比较时, P_{wu} 的代表性相对更好。从各指标的定义和资源利用的角度看,用 P_{wu} 来衡量宏观上粮食生产和水资源投入之间关系也是合理的: P_{wg} 将灌水量和降水总量作为水资源投入,然而通常情况下只有一部分降水转化为土壤水(绿水)而以蒸散形式被利用,其余部分则会以无效蒸发、流入河道、进入地下含水层等形式分离,即使有可能被以灌溉的方式重新利用于农田,但已经在灌水量中记入而造成重复计算,所以 P_{wg} 为指标往往造成水资源投入量偏大; P_{wl} 只考虑了对灌溉水的引用而忽略了降水的资源属性,从而不能全面揭示粮食生产对水资源的真实利用,况且降水贡献在粮食生产中占有极大比例,是保证粮食生产的关键^[10],所以 P_{wl} 在资源利用角度存在缺陷; P_{wET} 衡量的是田间尺度水分消耗状况,从农业生产用水角度看无法反映区域的工程状况,同时,输水和灌溉过程中的水分损失量虽然没有直接为作物生长服务,也是工程设计和灌溉引水计划中必须考虑的,将其排除就不能反映对水资源的真实需求。

3 结 论

(1) 根据不同的水分投入,计算出中国典型灌区上的毛入流量水分生产率(P_{wg})、毛灌水量(灌溉)水分生产率(P_{wl})、蒸散量水分生产率(P_{wET})和广义水资源利用水分生产率(P_{wu})4 个粮食水分生产率指标值分别为 $0.694\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1.361\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1.314\ \text{kg}/\text{m}^3$ 及 $0.860\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。水分生产率呈增加趋势,说明在一定水资源投入下的粮食产出在增大,这对于粮食安全保障与水资源合理利用有重要意义。

(2) 经济发展较快的直辖市和东北新兴粮食主产区的水分生产率增长较快,南方水资源丰富地区则没有明显变化,这也间接造成了水分生产率指标值的空间离散程度在增大。与其他指标相比, P_{wl} 的省区间差

异最大,指标间差异程度有随着水分投入项增大而降低的迹象。

(3) 各水分生产率指标的空间分布格局基本相似,均表现为黄淮海平原及其周边省区较大而位于华南、东南、东北及西北的部分省区较小;其中,河北、陕西、河南、山东等省份的各水分生产率指标均处于全国前列,海南、青海、黑龙江、辽宁等省份的各指标均较小;自然气候条件、作物种类、农业生产模式、灌溉工程保障程度及管理平等因素差异导致了水分生产率的空间格局。

(4) 不同年份4个指标两两之间均存在显著的线性相关关系,各指标均可用于衡量省级尺度水分生产率的空间格局;不同组合之间的相关系数存在差异, P_{wu} 与其他3个指标间的相关性均较好;从指标定义和资源利用的角度探讨了 P_{wu} 在表征省区间水分生产率差异中最具代表性的原因。

参考文献:

- [1] 丛振涛,姚本智,倪广恒. SRA1B情景下中国主要作物需水预测[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 38-43. (CONG Zhentao, YAO Benzhi, NI Guangheng. Crop water demand in China under the SRA1B emissions scenario [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 38-43. (in Chinese))
- [2] 刘路广,崔远来,王建鹏. 基于水量平衡的农业节水潜力计算新方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 696-702. (LIU Luguang, CUI Yuanlai, WANG Jianpeng. New calculation method for water-saving potential in agriculture based on water balance principle [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 696-702. (in Chinese))
- [3] QURESHI M E, GRANFTON R Q, KIRBY M, et al. Understanding irrigation water use efficiency at different scales for better policy reform: A case study of the murray-darling basin, Australia[J]. Water Policy, 2011, 13(1): 1-17.
- [4] CAI X, YANG Y, RINGLER C, et al. Agricultural water productivity assessment for the Yellow River basin[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1297-1306.
- [5] 陈皓锐,黄介生,伍靖伟,等. 灌溉用水效率尺度效应研究评述[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 872-880. (CHEN Haorui, HUANG Jiasheng, WU Jingwei, et al. Review of scale effect on the irrigation water use efficiency [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 872-880. (in Chinese))
- [6] HAIE N, MACHADO G, PEREIRA R, et al. Effective efficiency in water resources management using efficiency elasticity index [J]. Water and Environment Journal, 2011, 25(4): 532-539.
- [7] 刘路广,崔远来,吴瑕. 考虑回归水重复利用的灌区用水评价指标[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 522-528. (LIU Luguang, CUI Yuanlai, WU Xia. Study on water use assessment indices in irrigation district considering return flows [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 522-528. (in Chinese))
- [8] 陈皓锐,伍靖伟,黄介生,等. 石津灌区冬小麦水分生产率的尺度效应[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 49-55. (CHEN Haorui, WU Jingwei, HUANG Jiasheng, et al. Scale effect of water productivity for winter wheat in Shijin Irrigation District [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 49-55. (in Chinese))
- [9] TAO F, ZHANG Z. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013 70(S1): 146-165.
- [10] LIU J, FOLBERTH C, YANG H, et al. A global and spatially explicit assessment of climate change impacts on crop production and consumptive water use[J]. Plos One, 2013, 8(2): e57750.
- [11] ZWART S, BASTIAANSEN W, FRAITURE C, et al. A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1617-1627.
- [12] YUAN M, ZHANG L, GOU F, et al. Assessment of crop growth and water productivity for five C-3 species in semi-arid Inner Mongolia[J]. Agricultural Water Management, 2013, 122: 28-38.
- [13] 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 CSAE, 2012, 28(13): 1-7. (in Chinese))
- [14] TAO F, ZHANG Z. Climate change high-temperature stress rice productivity and water use in eastern china: A new super ensemble-based probabilistic projection[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(3): 531-551.
- [15] SUN S, WU P, WANG Y, et al. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444: 498-507.

Temporal and spatial variation and correlativity of water productivity indexes in irrigated land of China*

CAO Xinchun^{1,2}, WU Pute^{2,3}, WANG Yubao^{1,2}, ZHAO Xining^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Yangling 712100, China;

3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to quantify the water utilization in grain production from different perspectives, an analysis is performed on multiple water productivity indexes including the gross inflow water productivity (P_{wg}), the irrigation water productivity (P_{wl}), the evapotranspiration water productivity (P_{wET}) and the generalized water productivity (P_{wu}). The spatiotemporal variation of the four productivity indexes and the correlations among them for irrigated land in China are examined. Results show that the national values of the four indexes being 0.694, 1.361, 1.314, and 0.860 kg/m³, respectively. Moreover, these water productivity indices had increased between 1998 and 2010 in almost all of the provinces studied, although their spatial distributions remained similar in 1998, 2005, and 2010. The highest and lowest values are found for the provinces in and around Huang-Huai-Hai Plain and for the provinces in northeastern China, northwestern China, and south of the Yangtze River, respectively. The degree of spatial difference decrease as follows: $P_{wl} > P_{wET} > P_{wu} > P_{wg}$. We have found significant linear correlations between each pair of indexes, with correlation coefficients greater than 0.950 between P_{wu} and all other indexes. Despite considerable differences between the four indexes in terms of their applicability and numerical performance, all of them can be used to measure differences in the water productivity of grain crops between provinces.

Key words: water productivity; indicator; grain; irrigation; spatial distribution

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 12th Five-year Plan Period (No. 2011BAD29B09) and the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (No. B12007).