

# 中国灌区水分生产率及其时空差异分析

操信春<sup>1,2</sup>, 吴普特<sup>1,2,3,4\*</sup>, 王玉宝<sup>1,2</sup>, 赵西宁<sup>2,3,4</sup>, 刘静<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;  
3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100; 4. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘要:** 从粮食产出和广义水资源投入出发, 计算了 31 个省区灌溉农田的水分生产率并分析其时空变化特征, 同时建立广义水利用系数以评价水资源的有效利用率。结果显示: 由于粮食单产提高和灌溉用水量的减少, 1998—2010 年各省区水分生产率值均呈增大趋势, 全国平均值由 0.67 kg/m<sup>3</sup> 增大到 0.81 kg/m<sup>3</sup>; 空间自相关分析表明, 水分生产率值相似的省区在空间上显著地聚集, 全局 Moran's I 的检验值都大于 0.01 的置信水平, 高值省区以黄淮海平原为核心集中分布, 长江以南和东北则密集了低值省区, 局部自相关属性为高-高(HH)、低-低(LL)的省区超过了 20 个, 13 a 来总体和局部的空间分异特征随时间变化均不明显; 不同地区的广义水利用系数都随时间增加, 省区间水分生产率和广义水利用系数大小关系无一致性, 水分生产率高的省区亦存在较大节水潜力。从自然条件、农业生产特征、经济发展程度等方面宏观分析了水分生产率和广义水利用系数在空间差异的原因。该研究为灌区水资源管理宏观政策的制定提供依据。

**关键词:** 粮食, 灌溉, 模型, 广义水资源, 水分生产率, 空间自相关, 广义水利用系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.13.001

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-13-0001-07

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)

## 0 引言

中国农业用水占全国总用水量的近 70%, 其中的 90% 消耗于农田灌溉。全国有灌溉条件的耕地面积约占总面积的 48%, 生产了 75% 的粮食, 灌溉农业对粮食生产的支撑作用无可取代。随着社会经济的发展、工业和生活用水需求的增加以及气候、环境等问题的日趋严重, 部门之间对水资源的竞争愈加激烈, 灌溉用水将受到影响, 农业面临着用有限的水资源生产更多粮食的问题<sup>[1,2]</sup>, 这就要求控制农业用水量与继续提高农业水资源利用率和利用效率并举。

以往对农业用水效率的研究多关注灌溉用水(即蓝水)<sup>[3]</sup>、作物田间耗水<sup>[4-5]</sup>或区域内部的水资源利用、管理与评价<sup>[6-9]</sup>。近年, 随着广义水资源<sup>[10-11]</sup>、虚拟水贸易<sup>[12-14]</sup>、农业水足迹<sup>[15-16]</sup>等水资源利用和管理领域新概念的出现, 为水资源利用评价提供了全面而崭新的思路。农业用水量及效率评价不仅仅停留在田间、作物视角, 而

应该考虑整个农业生产过程<sup>[17]</sup>; 在计量灌溉水的基础上, 越来越多的人重视包括蓝水和绿水<sup>[18]</sup>在内的广义水资源利用。此外, 已有学者注意到生产效率的比较优势理论在不同区域间广义水资源利用效率和农产品转移评价中的应用<sup>[19]</sup>。所以明确不同区域的广义农业水资源生产效率及其区域差异就具有重要的意义。中国人口与农业水资源时空分布不均, 粮食生产与消费也出现空间错位, 由此引发了区域间可观的粮食调运和虚拟水转移<sup>[20-21]</sup>。鉴于中国粮食生产、输出和节水重点都在灌溉农业区, 所以有必要核算各省区灌区粮食生产对广义水资源的利用情况, 明晰水分生产率的空间差异及其随时间演变态势, 同时评价对比、不同区域广义水资源利用结构特征。

本文计算各省区广义水资源投入的粮食生产效率, 利用空间统计学方法研究其时空分布及变化特征, 在此基础上分析广义水资源的有效利用率及其空间差异。以期在系统地呈现中国灌溉农业区域广义水资源利用与粮食生产关系的基础上为相关宏观政策的制定提供依据。

## 1 方法与数据来源

### 1.1 灌区水分生产率的计算

本研究中水资源指的是广义水资源<sup>[11,18]</sup>, 其包括“蓝水”和“绿水”。蓝水是降水形成径流后进入河道、湖泊或地下含水层形成的地表水和地下水, 即传统的水资源; 绿水是降水下渗到非饱和土壤层中用于植物生长、以蒸散发形式垂向进入大气的不可见水。选取全国 443 个典型灌区(基本包括了所有的大型灌区, 见图 1)为基

收稿日期: 2011-11-22 修订日期: 2012-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50809055); 国家科技支撑计划(2011BAD29B09); 高等学校学科创新引智计划资助(No.B12007); 西北农林科技大学青年学术骨干项目

作者简介: 操信春(1986—), 男, 汉族, 江西鄱阳人, 博士生, 从事农业水土资源管理方面的研究。杨凌 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 712100。E-mail: caoxinchun@nwsuaf.edu.cn

\*通信作者: 吴普特(1963—), 男, 陕西武功人, 教授, 博士, 博士生导师, 中国农业工程学会会员(E041200091S), 主要从事节水农业与水土保持方面的研究。杨凌 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 712100。E-mail: Gjzwp@vip.sina.com

本单元, 从区域角度出发, 以广义水资源投入和粮食产出来衡量灌区水分生产率:

$$\theta = \frac{\lambda \times G}{IR + 10P_e} \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为水分生产率,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\lambda$  为复种指数;  $G$  为粮食平均单产,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 故  $\lambda \times G$  为单位耕地面积上平均粮食产量;  $IR$  为单位耕地面积的平均灌溉用水量, 即粮食生产中投入的蓝水,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $P_e$  为粮食作物生长期实际补充到作物根分布层可被其利用的有效降水量<sup>[22]</sup>, 即粮食生产中投入的绿水,  $\text{mm}$ ; 10 为  $\text{mm}$  与 “ $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ” 之间的单位换算系数。

由于小麦、水稻、玉米是最主要的粮食作物, 而且这 3 种作物的种植时间基本跨越了一年内适合粮食作物的种植时间段, 故以该 3 种作物的种植期的多年平均情况来界定有效降水的计算时间区间。收集了全国 180 个农业气象站 (观测台站) 主要粮食作物的生育期资料, 采用美国农业部土壤保持局推荐、当前得到公认和普遍推荐的方法计算各灌区有效降水<sup>[23]</sup>:

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

式中,  $P$ 、 $P_e$  分别为旬降水量和旬有效降水量,  $\text{mm}$ 。

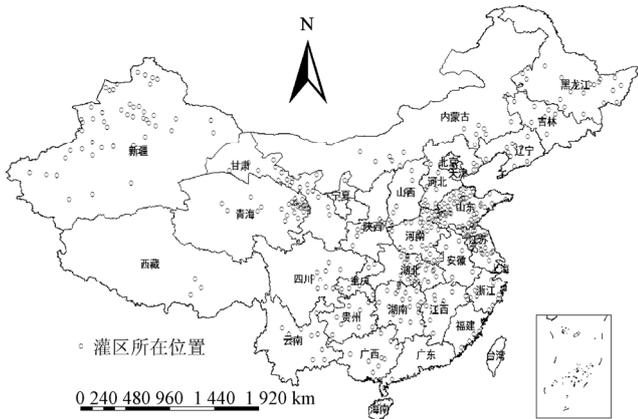


图 1 所选灌区分布图  
Fig.1 Distribution map of 443 large irrigated districts

将省区内各灌区水分生产率进行对灌区有效灌溉面积的加权, 结果可代表相应省区灌溉农田的广义水资源的水分生产率。由于数据限制, 选取 1998 年至今的起始年、中间年 (2005) 及末尾年 (2010) 为代表年, 来分析中国灌区水分生产率的时空变异特征。

## 1.2 空间自相关分析

空间自相关包括全局空间自相关和局部空间自相关, 能反映一个区域单元上某一属性与邻近区域单元上同一属性相关程度, 是空间域内聚集程度的一种量度<sup>[24]</sup>。全局空间自相关是对某种地理现象或某一属性在整个区域的空间特征的描述, 判断此现象或属性值在空间上是否存在聚集特性。通过对全局空间自相关统计量 Global Moran's  $I$  的估计来分析水分生产率  $\theta$  的总体空间关联或差异程度, 其计算公式如下<sup>[24]</sup>:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (3)$$

式中,  $n$  为样本点数;  $x_i$  为各省区的  $\theta$  值,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\bar{x}$  为  $x_i$  的均值,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $W_{ij}$  为省区  $i$  与  $j$  之间的空间链接矩阵。 $W_{ij}$  表示空间单元潜在的相互作用的力量, 其确定有 2 种方式: 1) 邻接矩阵, 即省区相邻为 1, 否则为 0; 2) 距离矩阵, 即  $i$  与  $j$  的距离小于指定距离时为 1, 反之则为 0<sup>[24]</sup>。

Global Moran's  $I$  检验统计量为标准化  $Z$  值, 表达式为

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (4)$$

检验统计量可以对区域单元的  $\theta$  值之间是否存在空间自相关进行显著性检验。显著性水平可以由标准化  $Z$  值的  $P$  值 ( $P$ -value) 检验来确定: 如果  $P$  小于给定的显著性水平 (本文取 0.05), 则区域间的全局空间自相关性显著。 $P$  值可以通过正态分布、随机分布或置换方法来获取。

用局部空间自相关测度局部区域单元  $\theta$  值的空间异质性, 推算出聚集地的空间位置、范围及其变化情况, 并以 LISA 聚集图的形式形象表征。与全国平均水平相比, 可以判断出一个省区  $\theta$  值在总体中所处的水平 (高或低), 使得 LISA 聚集图中属性可分为 4 种类型<sup>[25]</sup>: 高-高 (HH), 表示某一省区和周围省区的属性值都较高; 低-高 (LH), 表示某一省区  $\theta$  值较低而其周围省区较高; 高-低 (HL), 表示某一省区  $\theta$  值较高而周围省区较低; 低-低 (LL), 表示某一省区和周围省区的  $\theta$  值都较低。“高-高 (HH)” 和 “低-低 (LL)” 类型的观测值存在较强的空间正相关, 即存在均质性, “低-高 (LH)” 和 “高-低 (HL)” 类型的观测值表示存在较强的空间负相关, 省区间存在异质性。同样, 在给定显著性水平时, 可以分别判断各区域局部空间自相关属性的显著性。

## 1.3 粮食生产中的广义水利用系数

为了评价广义水资源利用状况, 根据其消耗途径, 定义粮食生产过程中的广义水资源利用系数, 即广义水利用系数  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\eta \times IR + 10P_e}{IR + 10P} \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为灌溉水利用系数。 $\alpha$  为农田实际消耗的水资源量占总水资源量的比例, 反映了广义水资源的有效利用率, 所以  $1-\alpha$  值为理论上区域粮食生产的节水潜力,  $\alpha$  越大说明粮食生产过程中浪费水的比例越小, 反之越大, 结合  $\theta$  与  $\alpha$  可以对比、评价区域农业生产对水资源利用的合理性。

## 1.4 数据来源

所选灌区 (不包括港澳台地区) 代表年的旬降水量来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>, 2011.4), 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、有效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工作”中各灌区的总结报告中对该灌区基本情况的统计表，统一由中国灌溉排水发展中心提供，此外，还有少量数据来源于中国大型灌区网站（www.dxgq.org.cn，2011.5 月）及部分灌区管理局；各农业观测站点的主要粮食作物生育期数据由水利部灌溉试验总站提供，一部分来源于实地参与式调查和文献资料；尚参考了 1998-2010 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 灌区水分生产率

通过式 (1) 可以得到 1998、2005 及 2010 年各省区灌区水分生产率值。3 个代表年全国平均值分别为 0.67、0.76 和 0.81 kg/m<sup>3</sup>，各省区及全国值在年际变化基本上均呈现递增态势 (图 2)，这说明生产单位质量的粮食需投入的广义水资源量在逐渐减少。灌区统计数据显示，这一方面与粮食单产的提高有关，另一方面也因灌区基础设施的改造使得灌溉水利用系数增大进而减少了灌溉引水量。

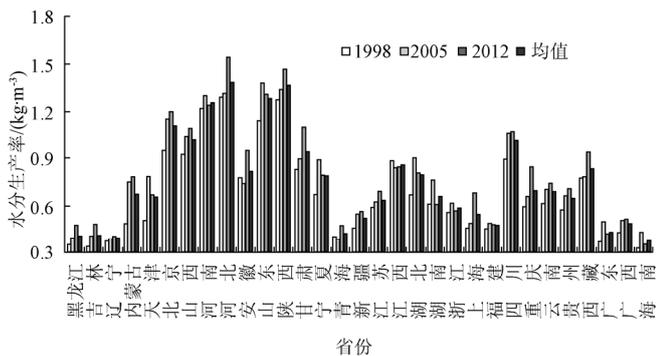


图 2 1998、2005 及 2010 年各省区的灌区水分生产率

Fig.2 Water productivity of 31 provinces in 1998、2005 and 2010

用 3 个代表年的平均值来概示各省区水分生产率的多年平均值，以比较省区空间差异。图 2 显示，中国水分生产率的省区差异较大，总体来说华南、东南地区较低而黄淮海地区较高；河北的水分生产率最高，达 1.38 kg/m<sup>3</sup>，陕西、山东及河南排名 2-4 位，均超过了 1.25 kg/m<sup>3</sup>；海南的水分生产率仅为 0.37 kg/m<sup>3</sup>，全国最低，广东、福建、广西在南方紧随其后；东北三省在 0.40 kg/m<sup>3</sup> 左右，仅比海南稍高；仅青海、新疆是处在水分生产率低区的北方旱区，四川、江西的值分别是 1.01 kg/m<sup>3</sup> 和 0.86 kg/m<sup>3</sup>，均为南方为数不多的高值省区之一。广义水分生产率与区域的自然条件、作物类型、农业生产水平等因素密切相关：陕西关中和黄淮海平原是中国传统的粮食主产区，地势平坦、土地肥沃，农业生产水平较高，粮食产量较高的同时水资源问题十分严峻使得灌溉用水的控制，这些地区耕地面积上对应的粮食产量接近 13 500 kg/hm<sup>2</sup>，人均河川径流量不足 400 m<sup>3</sup>，平均灌水量仅在 4 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 左右，故水分生产率全国最高；水资源丰富、经济相对发达的华南及东南地区以种植高耗水的水稻为

主，属“水稻灌溉地带”，作物灌溉需水指数为 30%~60%<sup>[26]</sup>，加上农业生产管理粗放使得灌溉引水量大同时浪费大，如灌区统计数据显示，海南的灌溉引水量达 18 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，这是水分生产率低的主要原因；东北三省也种植了大量的水稻，灌溉引水量也较大，虽然粮食单产较高，但因无霜期短、复种指数仅为 1，加上灌溉水利用系数均在 0.47 左右，所以水分生产率还有很大的提升空间；四川和江西是传统的农业大省和粮食主产区，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理所当然。

### 2.2 灌区水分生产率的时空格局

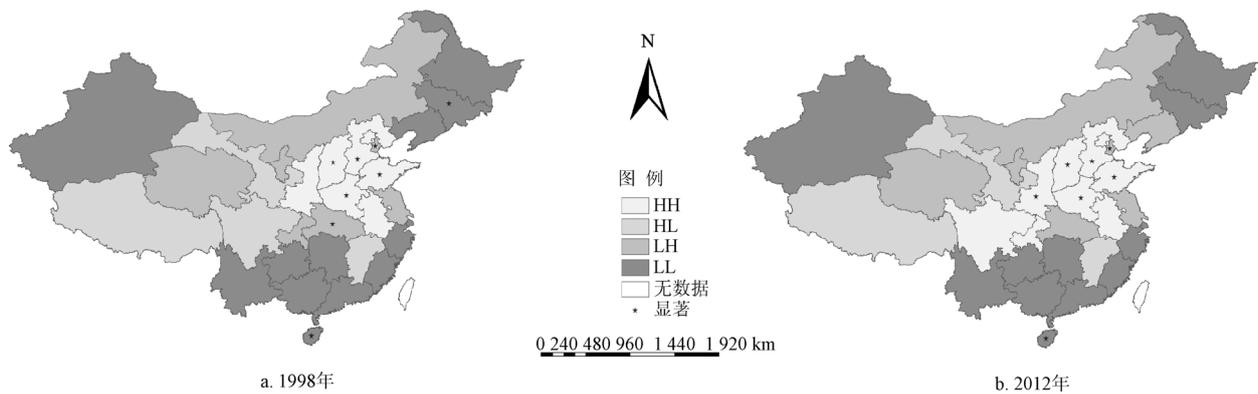
由以上结果、分析可知，中国各省区灌溉农田上的广义水分生产率在空间上呈较明显的连片分布特征，说明其可能受相邻省区的自然、社会经济条件的相似而存在空间关联。故可用空间自相关分析方法解析中国灌溉农田水分生产率的时空格局。

全局空间自相关能描述地理属性间的总体差异及其变化情况。表 1 给出了代表年灌区水分生产率全局 Moran's I 估计值及检验。结果显示，代表年全局 Moran's I 估计值均大于零，且对应的正态统计量 Z 值 (Z-Score) 均大于正态分布函数在概率为 0.05 时的临界值 (1.96)，均通过了显著性检验。说明代表年灌区水分生产率在各省区间的存在正自相关关系，总体上表现为相似值的空间显著聚集。由于各灌区其他年份的灌水和粮食数据无法获取，所以不能直接计算相关参数并判断该年份全局空间自相关分析结果。但是查究 1998—2010 年全国及各省区农业、水利、水资源、气象及其他相关统计资料可以发现，研究时段内全国各省区的粮食产量、农业用水量、农田灌溉用水量、降水量等和水分生产率关系密切的数据均在正常范围内波动，没有出现突变的年份。再考虑农业生产系统具有较强的稳定性，可以认为其他年份省区间水分生产率大小关系与代表年无太大差异。故可判定，中国灌区水分生产率存在正自相关关系，相似值之间相互聚集，即灌区水分生产率高的省区在空间上成片聚集，灌区水分生产率低的省区也趋于相邻。灌区水分生产率与降水、作物类型、土壤等自然因素关系密切，同时也受灌溉、粮食产量、生产投入及农业生产管理方式等社会经济条件的影响，而以上各因素在中国基本上均表现出地理空间上的相似性，这是相似水平的灌区水分生产率的省区在空间上聚集的原因。

表 1 代表年灌区水分生产率 Moran's I 及检验  
Table 1 Moran's I test for WP of 1998, 2005 and 2010

参数	1998 年	2005 年	2010 年
Moran's I	0.2411	0.3587	0.3488
Z 值	3.5441	5.0434	4.9257
p 值	0.0003	0	0

采用空间关联局域指标 LISA 来进一步分析水分生产率区域分布的时空演变特征。利用 Geoda 软件计算出不同省区的 LISA 指数，进行显著性检验，图 3、4 为 1998 和 2010 年中国灌区水分生产率 LISA 聚集图。



注：HH 为某一省区和周围省区的属性值都较高；LH 为某一省区水分生产率较低而其周围省区较高；HL 为某一省区水分生产率较高而周围省区较低；LL 为某一省区和周围省区的水分生产率都较低。

图3 1998及2010年水分生产率LISA聚集图  
Fig.3 LISA cluster map of water productivity in China in 1998 and 2010

LISA 聚集图总体体现了自然气候、农业生产水平、经济条件及水资源禀赋等影响水分生产率因素的区域差异。从 LISA 聚集图可以看出（2005 年和代表年平均值的 LISA 聚集图中，落入各个象限的省区个数以及分布状况与 1998 及 2010 年相近，故略去），HL 省区不多于 4 个，其余皆落入 HH、LL 及 LH 区，其中位于 HH、LL 区的省区超过了 20 个；HH 省区以黄淮海平原为核心集中分布，LL 省区则连片聚集于长江以南和东北地区，均表现出空间正相关；属非典型区的 LH 及 HL 省区在空间上无明显集中分布的态势；以上现象进一步印证了全局空间自相关的分析结果。从 1998 到 2010 年，LH 的数量均为 7，其中显著个数由 2 变为 1；LL、HL 分别由 13、4 个减少了 1 个；HH 区在 7 个的基础上增加 2，显著个数由 4 变为 5；各象限省区个数变化很小，显著个数也仅减少一个。总体说来，13a 来水分生产率的局部分异特征没有明显的变化，这可能与省区间自然和社会经济条件差异的相对稳定有关。

具体来说，天津一直为显著的 LH 区，说明其水分生产率明显低于与其相邻的河北、北京，这是因为在气候、种植结构和粮食单产相当相似的情况下，天津灌溉引水量的  $9750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  明显高于河北、北京的  $3750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  左右；江西落入 HL 区，分析可知，其代表年均水分生产率为  $0.86 \text{ kg/m}^3$ ，分别为邻省福建、广东的 1.8 及 2.0 倍，可能因社会经济因素对水分生产率其主导影响作用，江西是中国的粮食主产区之一，经济发展滞后而农业生产水平相对较高，使得灌溉用水量少而单产比前述两省高；由于水资源丰富并以水稻为主，处于 HH 核心区边缘的湖北水分生产率由  $0.66 \text{ kg/m}^3$  增大到  $0.81 \text{ kg/m}^3$ ，其局部自相关属性为 LH，但显著性在减弱，此外，四川、重庆均从非典型区（LH、HL）跳入了 HH 区。LISA 聚集图的属性分布及其变化反映了省区间自然条件、农业生产及其它社会经济条件的异同。

### 2.3 广义水资源有效利用率

利用式 (5) 得到代表年各省区广义水利用系数  $\alpha$  的均值，结果见表 2。同时，对 2 个指标进行了排序。表中

的  $L_\alpha$ 、 $L_\theta$  分别表示该省区的  $\alpha$ 、 $\theta$  大小在全国的位次， $\Delta_L$  则为  $L_\alpha$  与  $L_\theta$  差值的绝对值，用以表示两者的错位程度。

表2 各省区广义水利用系数

Table 2 Effective utilization rate of generalized water resources in 31 provinces

区域	$IR/\text{mm}$	$P/\text{mm}$	$\eta$	$\alpha$	$L_\alpha$	$L_\theta$	$\Delta_L$
北京	1 251.9	572.9	0.608	0.651	1	5	4
西藏	760.4	451.5	0.565	0.638	2	10	8
云南	938.2	868.1	0.507	0.632	3	15	12
甘肃	1 465.5	172.8	0.540	0.622	4	8	4
陕西	1 390.5	662.7	0.514	0.591	5	2	3
山西	564.4	444.5	0.413	0.58	6	6	0
辽宁	518.0	646.4	0.523	0.579	7	30	23
湖北	392.0	1143.3	0.434	0.578	8	12	4
天津	360.4	518.3	0.523	0.577	9	18	9
重庆	975.0	1182.3	0.441	0.573	10	14	4
上海	399.8	1150.0	0.667	0.567	11	22	11
吉林	762.1	611.9	0.517	0.566	12	28	16
青海	587.3	392.0	0.409	0.552	13	27	14
山东	329.6	665.4	0.497	0.549	14	21	7
江苏	575.8	1 120.8	0.510	0.549	15	3	12
浙江	336.1	1 297.1	0.457	0.549	16	20	4
新疆	1 040.0	219.3	0.461	0.542	17	23	6
黑龙江	746.9	494.6	0.477	0.541	18	29	11
河南	463.1	898.4	0.414	0.538	19	4	15
河北	558.7	534.7	0.426	0.537	20	1	19
四川	726.9	986.6	0.458	0.537	21	7	14
安徽	1 164.2	856.5	0.455	0.53	22	11	11
湖南	720.8	1 093.3	0.422	0.528	23	17	6
贵州	871.0	1 022.9	0.428	0.527	24	19	5
宁夏	736.6	172.5	0.397	0.491	25	13	12
海南	916.0	1 411.4	0.436	0.491	26	31	5
广东	1 154.8	1 482.9	0.416	0.488	27	26	1
福建	1 825.9	1 263.9	0.413	0.487	28	25	3
江西	1 459.7	1 408.0	0.391	0.481	29	9	20
广西	1 815.4	1 465.1	0.383	0.462	30	24	6
内蒙古	1 142.8	261.0	0.348	0.454	31	16	15
全国	869.4	821.7	0.466	0.548	/	/	/

注： $IR$  为单位耕地面积的平均灌溉用水量； $P$  分别为旬降水量； $\eta$  为灌溉水利用系数； $\alpha$  为农田实际消耗的水资源量占总水资源量的比例； $L_\alpha$ 、 $L_\theta$  分别表示该省区的  $\alpha$ 、 $\theta$  大小在全国的位次； $\Delta_L$  则为  $L_\alpha$  与  $L_\theta$  差值的绝对值，用以表示两者的错位程度。

表 2 显示, 1998—2010 年, 除安徽外, 各省区  $\alpha$  值均呈增加态势, 其中以中小型灌区为主青海净增 0.161, 增幅达 32%, 为全国之最, 这一方面因为青海降水量小、作物利用比例较高, 同时可能与中小型渠系结构相对简单、节水改造效果明显有关。2010 年全国平均水平的  $\alpha$  值为 0.589, 意味着当前在灌溉农业区, 超过 40% 的广义水资源没有为粮食作物的蒸腾及其棵间蒸发服务。用 3 个代表年的  $\alpha$  平均值来比较广义水资源利用率的省区差异:  $\alpha$  相近的省区无在空间上聚集的迹象, 如黄淮海地区的北京较大而河南、河北、安徽等省较小, 西部的西藏、云南、甘肃等省区较大而四川、贵州及宁夏都很小; 具体来说, 北京最大, 为 0.651, 西藏、云南排 2、3 位, 均超过了 0.600; 内蒙古最低, 不足 0.550, 广西、江西、福建、福建、广东、海南及宁夏均在 0.500 以下。北京经济发达、粮食生产规模小, 节水技术使用率高, 《中国统计年鉴》及《中国水利统计年鉴》数据显示, 2010 年的节水灌溉面积占总灌溉面积高达 86%, 全国第一, 使得灌溉水量和浪费量均较小, 同时, 该地区降水量  $P$  不大而有效降水可观 (380 mm 左右), 故粮食生产中的广义水利用系数高。广西、江西、福建等南方诸省  $\alpha$  值较小的主要原因在于降水量大而作物利用比率有限。内蒙古虽然降水量最小、有效降水比例较高, 但是年有效降水量仅在 200 mm 左右, 须引取大量的灌溉用水方能保障粮食生产, 同时, 该区大型灌区的灌溉水利用系数  $\eta$  仅为 0.350 左右, 远低于其它省区, 造成了  $\alpha$  值全国最小。因此提高灌溉水的利用率和利用效率从而减少灌溉引水量可以增大广义水资源的有效利用率。

各省区水分生产率  $\theta$  和广义水利用系数  $\alpha$  在全国范围内排序并无较强的一致性, 两项指标的排名错位数  $\Delta_L$  大于 10 的省区高达 14 个。河北的  $\theta$  值全国最高,  $\alpha$  却落到了 20 名, 年均值仅约 0.537, 说明在水分粮食生产率较高的前提下水资源有效利用率还有较大提升空间; 国家粮食主产区江西和内蒙古的  $\theta$  值处于中上游水平, 而广义水利用系数很小, 亦有较大的节水潜力。此外, 辽宁的  $\theta$  值居全国倒数第二, 而  $L_\alpha$  靠前 (为 7), 说明虽然该区降水和灌溉水资源利用较多、粮食单产不高, 但灌溉水输移过程中的损失较少, 黑龙江的情况与之类似, 今后提高广义水资源的粮食生产率的途径应注重田间管理 (如施肥) 以及作物新品种的引进等。

### 3 讨论

中国粮食生产与人口分布空间不匹配, 使得省区间存在大量的粮食调运, 其中黄淮海 (河南、河北、山东、安徽) 和东北 (黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古) 为主要的粮食输出区<sup>[21,27]</sup>。生产效率的比较优势理论认为, 若水密集型的农产品由水资源利用效率高的区域调入水资源利用效率低的区域, 不仅能缓解调入区的水资源压力, 还能在全国范围内节约水资源<sup>[19,27]</sup>。黄淮海地区在粮食水分生产效率上存在明显的比较优势, 相比于在其他省区生产粮食, 有利于全国范围的水资源的节约, 加大灌溉面积及粮食生产规模有利于国家粮食保障和水分利用效

率的提高。但该地区是水资源和环境问题最严重的区域之一, 且粮食生产用水的有效性在全国也不占明显优势。故应进一步大力发展现代节水农业, 减少农业生产过程中水资源的无效损耗, 同时增加跨流域调水对农业和生态的供给<sup>[20]</sup>, 满足区域发展需求。相反, 东北地区对外贡献粮食是以相对浪费大量的水资源为代价的, 在水资源的利用效率上相对不经济<sup>[27]</sup>。由于气候条件限制, 在复种指数难以增大的情况下, 扩大灌溉面积或将水资源转移到生产附加值的工业或服务中是提高水资源利用效益的有效途径。

### 4 结论

从区域角度出发, 以广义水资源投入的粮食产出能力作为水分生产率指标, 分析了 1998—2010 年中国各省区灌区的水分生产率。13 a 来, 全国灌溉农田的水分生产率均为上升趋势, 但省区间差异较大, 多年平均情况看, 31 个省区在 0.37~1.38 kg/m<sup>3</sup> 范围内变化。因水分生产率与灌区所在省区的气候条件、水资源、地理条件作物种类、农业生产水平的因素有关, 利用空间自相关方法分析发现, 其在空间上呈显著聚集现象, 高值省区分布黄淮海平原及其周边区域, 低值省区则主要位于长江以南和东北。且 13 a 间的空间上的总体分布格局和局部差异状况均相对稳定, 随时间变化不大。

灌区粮食生产用水有效利用率在增大的同时省区间差异也较大, 代表年广义水利用系数的平均情况看, 全国值为 0.548, 各省区基本在 0.450~0.650 之间变化, 主要表现为南方富水省区和部分西北内陆省区较小。水分生产率和广义水利用系数两项指标在省区间的大小关系并无一致性, 即部分省区前者在全国的排名均明显高于后者, 水分生产率高的省区亦存在较大节水潜力。

#### [参 考 文 献]

- [1] Kijne J W, Barker R, Molden D. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement[C]// Cambridge MA USA, 2003.
- [2] 吴普特, 赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 1—6.  
Wu Pute, Zhao Xining. Impact of climate change on agricultural water use and grain production in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 46—50.  
Zheng Jie, Li Guangyong, Han Zhenzhong. Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [4] 贾宏伟, 卢成. 基于非充分灌溉理论的水稻田间水利用效率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 38—41.  
Jia Hongwei, Lu Cheng. Calculation method of field water use efficiency of rice based on the theory of deficit

- irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 38—41. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李全起, 沈加印, 赵丹丹. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 33—36.
- Li Quanqi, Shen Jiayin, Zhao Dandan. Effect of irrigation frequency on yield and leaf water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [6] 雷波, 刘钰, 许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 10—14.
- Lei Bo, Liu Yu, Xu Di. Estimating theory and method of irrigation water-saving potential based on irrigation district scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [7] 冯峰, 许士国. 灌区水资源综合效益的改进多级模糊优选评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 56—61.
- Feng Feng, Xu Shiguo. Improved fuzzy-optimized multi-level evaluation for comprehensive benefit of water resources in irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 56—61. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈皓锐, 黄介生, 伍靖伟, 等. 井渠结合灌区用水效率指标尺度效应研究框架[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 1—7.
- Chen Haorui, Huang Jiesheng, Wu Jingwei, et al. Scale effect research framework of irrigation water use efficiency indices in well-canal combined irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [9] 岳卫峰, 杨金忠, 占车生. 引黄灌区水资源联合利用耦合模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 35—40.
- Yue Weifeng, Yang Jinzhong, Zhan Chesheng. Coupled model for conjunctive use of water resources in the Yellow River irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(4): 35—40. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 12—17.
- Wang Hao, Wang Jianhua, Qin Dayong, et al. The study on water resources assessment and subject system of water resources study on modern times[J]. Advance In Earth Sciences, 2002, 17(1): 12—17. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.
- Li Baoguo, Huang Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 575—583. (in Chinese with English abstract)
- [12] 鲁仕宝, 黄强, 马凯, 等. 虚拟水理论及其在粮食安全中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 59—64.
- Lu Shibao, Huang Qiang, Ma Kai, et al. Virtual water theory and its application in food security[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 59—64. (in Chinese with English abstract)
- [13] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible, Priorities for Water Resources Allocation and Management[C]// London: ODA, 1993, 13—26.
- [14] 粟晓玲, 康绍忠. 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 128—132.
- Su Xiaoling, Kang Shaozhong. Multi-objectives allocation model of water resources and its application in the Shiyang River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 128—132. (in Chinese with English abstract)
- [15] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water resource management, 2007, 21(1): 35—48.
- [16] Hoekstra A Y, Chapagain A K. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities[J]. Ecological economics, 2007, 64(1): 143—151.
- [17] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. Hydrology and earth system sciences, 2010, 14(7): 1259—1276.
- [18] Falkenmark M, Rockström J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(3): 129—132.
- [19] Fader M, Gerten D, Thammer M, et al. Internal and external green-blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(5): 1641—1660.
- [20] 吴普特, 赵西宁, 操信春, 等. 中国“农业北水南调虚拟工程”现状及思考[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 1—6.
- Wu Pute, Zhao Xining, Cao Xinchun, et al. Status and thoughts of Chinese “agricultural north-to-south water diversion virtual engineering”[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [21] 马静, 汪党献, Hoekstra A. Y. 虚拟水贸易与跨流域调水[J]. 中国水利, 2004(13): 37—39.
- Ma Jing, Wang Dangxian, Hoekstra. Virtual water trade and diversion water[J]. China Water Resources, 2004(13): 37—39. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨贵羽, 汪林, 王浩. 基于水土资源状况的中国粮食安全思考[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 1—5.
- Yang Guiyu, Wang Lin, Wang Hao. Thinking of food security in China based on regional water resources and land cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [23] Petra Doll, Stefan Siebert. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1037—1048.
- [24] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 393—400.  
Meng Bin, Wang Jinfeng, Zhang Wenzhong, et al. Evaluation of regional disparity in china based on spatial analysis[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 393—400. (in Chinese with English abstract)
- [25] 蒲英霞, 葛莹, 马荣华, 等. 基于 ESDA 的区域经济空间差异分析: 以江苏省为例[J]. 地理研究, 2005, 24(6): 965—974.
- Pu Yingxia, Ge Ying, Ma Ronghua, et al. Analyzing regional economic disparities based on ESDA[J]. Geographical Research, 2005, 24(6): 965—974. (in Chinese with English abstract)
- [26] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 2—3.
- [27] Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Application of virtual water trade theory in interregional grain allocation and transportation in China[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(80): 18463—18471.

## Analysis on temporal and spatial differences of water productivity in irrigation districts in China

Cao Xinchun<sup>1, 2</sup>, Wu Pute<sup>1, 2, 3, 4\*</sup>, Wang Yubao<sup>1, 2</sup>, Zhao Xining<sup>2, 3, 4</sup>, Liu Jing<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry 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; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Based on grain output and generalized water resources input, water productivity and utilization factor of generalized water in irrigation districts of 31 provinces were counted and its spatial and temporal differences were analyzed. The results showed that water productivity of every province presented an increasing trend, and national average water productivity increased from 0.67 kg/m<sup>3</sup> to 0.81 kg/m<sup>3</sup> from 1998 to 2010. Spatial autocorrelation analysis results showed provinces with resemble water productivity value showed significant aggregation, and Moran's I inspection values were higher than confidence level (0.01). Distributions of provinces with high water productivity value were centered with Huang-Huai-Hai plain, and provinces with lower water productivity values were distributed in South and Northeast China. Local autocorrelation analysis revealed that more than 20 provinces showed high-high positive autocorrelation(HH) and low-low positive autocorrelation(LL), general and regional spatial differentiation characteristics in 1998-2010 was insignificant. Generalized water use coefficient of different province increased, and there were no consistency on relations between water productivity and water use coefficient in different provinces, there were still great water saving potential in provinces with high water productivity value, and reasons of spatial differences for water productivity and generalized water utilization factor were analyzed from natural conditions, agricultural production features, economic development levels, etc. This research provides references for making macro policies of water resources management in irrigation districts.

**Key words:** grain, irrigation, models, generalized water resources, water productive efficiency, spatial autocorrelation analysis, utilization factor of generalized water