排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2012 年 5 月 May 2012 | 第 30 卷 第 3 期 Vol. 30 No. 3
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.03.021

中国灌溉水粮食生产率及其时空变异

操信春[1,2]，吴普特[1,2,3]，王玉宝[1,2]，赵西宁[2,3]，张宝庆[1]
（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：为了评价农业引水总量的生产效益，从主要灌区的实际灌溉水和粮食生产数据入手，计算、比较了 31 个省区的灌溉水粮食生产率，利用空间自相关分析方法对 1998—2010 年中国灌溉水粮食生产率的时空变异规律进行探究. 结果显示：各省区灌溉水粮食生产率呈增大趋势，代表年的中国均值为 1.03 kg/m^3，最大、最小值分别为河南的 2.15 kg/m^3 和海南的 0.25 kg/m^3，区域间差异较大；灌溉水粮食生产率在空间上存在显著的聚集现象，聚集程度随时间变化不明显，高值省区以黄淮海平原为核心集中分布，长江以南则密集了低值省区；江西、安徽及重庆灌溉水粮食生产率的变化幅度与其相邻省区不同步，造成了局部分异特征的变化. 分析了中国灌溉水粮食生产率格局的形成及其随时间变化的原因.

关键词：灌溉水粮食生产率；时空分异；中国；空间自相关；灌区
中图分类号：S274　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2012)03-0356-06

Spatial and temporal variation of crop water productivity in China

Cao Xinchun[1,2], *Wu Pute*[1,2,3], *Wang Yubao*[1,2], *Zhao Xining*[2,3], *Zhang Baoqing*[1]
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to evaluate the water use efficiency in agriculture in China, the data relevant to the water used for crop production of 459 large irrigation districts in 31 provinces in the years of 1998, 2005 and 2010 were collected; then the values of Grain Irrigation Water Productivity (G) was calculated. The spatial autocorrelation analysis was carried out to study the spatial and temporal variation of G during 1998—2010. The results revealed that G is increased with year in every large irrigation district in all the provinces; meanwhile, the G for a representative year is 1.03 kg/m^3, the maximum one is 2.15 kg/m^3 in Henan and the minimum is 0.25 kg/m^3 in Hainan. There is a clear spatial clustering phenomenon, i.e. a higher G is in Huang-Huai-Hai region whilst a lower one is found in the south of China. The amplitudes of change in G in Jiangxi, Anhui and Chongqing are different from their neighbors, a localized effect is presented. The reasons for such spatial and temporal variation of G were elaborated.

Key words: grain irrigation water productivity; spatial and temporal variation; China; spatial autocorrelation; irrigation districts

收稿日期：2011-09-30
基金项目："十二五"国家科技支撑计划项目(2011BAD29B09)；教育部、国家外国专家局"111"计划项目(B12007)；西北农林科技大学青年学术骨干项目和基本科研业务费资助项目
作者简介：操信春(1986—)，男，江西鄱阳人，博士研究生(caoxinchun@nwsuaf.edu.cn)，主要从事农业水土资源管理方面的研究.
吴普特(1963—)，男，陕西武功人，研究员，博士生导师(通信作者，gzjwpt@vip.sina.com)，主要从事节水农业与水土保持方面研究.

中国是粮食消费和农业用水大国,农业占用了全国取水量的近70%,其中的90%用于农田灌溉[1].有灌溉条件的耕地面积约占总面积的48%,生产了75%的粮食[2],农业灌溉对粮食安全起到了无可取代的支撑作用.随着社会经济的发展、工业和生活用水需求的增加及环境问题的出现使得用水部门之间对水资源的竞争愈加激烈,农业灌溉所获得的水资源将得到控制,农业面临着用越来越少的水资源生产更多的粮食问题[3],这就要求控制农业用水总量的同时提高农业水资源利用率和利用效率.我国人口、粮食生产及水资源时空分布不匹配,区域间存在相当数量的粮食调运和虚拟水转移[4],由于区域农业用水效率的差异,虚拟水贸易不仅仅保障了国家粮食安全,还能在全国范围内实现节水效益[5].这使得农业用水的效率提高不仅能缓解当地水资源短缺、促进社会经济发展,为全国水资源安全的保障也起到积极作用.

衡量农业水生产率的指标众多[6]且具有尺度效应[7-8],不同的区域和评价视角所关注的重点问题存在差异,农田角度作物水分生产率[9-11]和区域(灌区或行政区)尺度农业用水效率的评价及水资源优化配置是当前研究的主要方向[12-13],但很少关注灌溉用水总量与粮食生产的关系及其时空差异性.农业生产所需的水资源中,灌溉水比降水具有更高的会计成本和机会成本,灌溉水的节约和转移对社会经济的发展具有更加实际的作用,同时,对区域用水总量控制政策的制订也需要考虑供水量的生产效益及其时空差异性.文中从中国主要灌区入手,估算各省灌溉用水的粮食生产率,利用空间统计分析方法研究各区域灌溉水粮食生产率的时空分布及变化特征,以期在系统地呈现中国农业灌溉取水与粮食生产关系的基础上为区域农业生产和水资源利用政策的制订提供理论依据.

1　研究方法与数据来源

1.1　灌溉水粮食生产率的估算

由于各地区灌溉农田所对应的粮食产量数据难以获取,而灌区易得,故以分布于除港、澳、台外各省区的459个主要灌区为基本单元.所选点囊括了各省区所有主要灌区,能代表该省区灌溉农业的水资源利用和粮食生产状况.灌区的灌溉水粮食生产率用粮食产量和灌溉引水量的商来计算,将省级单元内各灌区的灌溉水粮食生产率对有效灌溉面积加权,以估算该省区的灌溉水粮食生产率.

用1998,2005及2010年这3个代表年的各省区的灌溉水粮食生产率值来分析1998—2010年中国灌溉水粮食生产率的时空分异特征.3个代表年的灌区灌水量、粮食产量、渠系及灌溉水利用系数等数据来自于各灌区管理局;1998—2010年的全国及各省农业生产和水资源数据来自对应年份的《中国农业统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《中国水利年鉴》、中国及各地区水资源公报;部分数据通过相关文献资料及参与式调查方法获得.研究区域涉及中国大陆的31个省(市、自治区),因故,不考虑香港、澳门特别行政区及台湾省.

1.2　空间自相关分析

空间自相关能反映一个区域单元上某种地理现象或某一属性与邻近区域单元上同一现象或属性相关程度,是空间域内聚集程度的一种量度,包括全局空间自相关和局部空间自相关2个大类[14].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.文中通过对Global Moran's I 全局空间自相关统计量的估计来分析区域总体的空间关联或差异程度,其计算公式为

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

式中:n 为样本点数;x_i 为各样本某属性的观测值;$\bar{x}$ 为 x_i 的均值;$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为研究对象 i 与 j 之间的空间链接矩阵,表示空间单元潜在的相互作用的力量.在给定显著水平(文中为0.05)时,若Moran's I 显著为正,则表示灌溉水粮食生产率相当的区域在空间聚集;若Moran's I 显著为负,则表示总体上各区域与周边的地区的灌溉水粮食生产率差异较大.

用局部空间自相关测度局部区域单元灌溉水粮食生产率的空间异质性,推算出聚集地的空间位置、范围及其变化情况.Local Moran's I 能够揭示各个区域单元空间自相关的程度,其计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i-\bar{x})[(n-1)-\bar{x}^2]}{\left(\sum_{j=1,i=1}^{n}x_{ij}^2\right)\sum_{j=1}^{n}(x_j-\bar{x})}. \quad (2)$$

局部自相关属性分为4种类型[15]:高-高(HH),表示某一空间单元和周围空间单元的属性值都较高;低-高(LH),表示某一空间单元属性

值较低而其周围空间单元较高;高 - 低(HL),表示某一空间单元属性值较高而其周围空间单元较低;低 - 低(LL),表示某一空间单元和周围空间单元的属性值都较低.“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,空间单元间存在异质性.

2 结果与分析

2.1 中国灌溉水粮食生产率

根据灌溉水粮食生产率估算公式得到了1998,2005及2010年中国各省的灌溉水粮食生产率值.3个代表年灌溉水粮食生产率 G 的全国平均值分别为0.81,0.93及1.34 kg/m^3,全国及各省区的灌溉水粮食生产率基本上均呈随时间增加态势(见图1),说明生产单位质量的粮食所需提供的灌溉水量越来越少.这和近年中国粮食稳步增产的同时农业用水比例下降的趋势相一致,可能与国家对灌区基础设施改造的投入、高产农作物新品种的推广、水资源高效利用技术的使用等因素有关.灌溉水粮食生产率的提高使得有限的蓝水资源可以向高产值的工业、服务业转移,有利于社会的可持续发展.图1还给出了31个省区3个代表年的平均值,以分析灌溉水粮食生产率的空间差异.

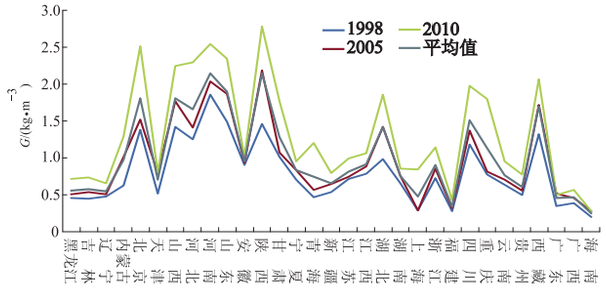


图1 31个省区的灌溉水粮食生产率

Fig. 1 Grain irrigation water productivity (G) of 31 provinces

省区间平均灌溉水粮食生产率差异较大,总体为北方省区大于南方省区.灌溉水粮食生产率较大的省区主要集中于华北和黄河中下游地区,其中河南、陕西和山东排名前三,分别达2.15,2.14及1.90 kg/m^3,说明三省利用较少的灌溉水就能生产较多的粮食;东南及华南地区的灌溉水粮食生产率相对较低,最低的海南、福建、广东的灌溉水粮食生产率仅为0.25,0.34及0.45 kg/m^3,分别为河南省的11.7%,15.9%和21.1%,为全国平均值24.5%,33.2%及44.2%;长江中下游、西南及东北地区多处于0.5~1.0 kg/m^3,与高值存在较大的差距.这是符合中国农业生产和水资源利用空间格局的:文中的取值样本点为灌区,河南、陕西和山东的大型灌区分别主要分布于淮河以北、黄河沿岸及关中平原,这些地区都是中国传统而重要的粮食主产区,也是水资源短缺问题严峻的地区,自古以来的精耕细作使得农业生产水平一直较高,同时相对完备的农田灌溉设施使灌溉水利用系数较大,加上对降水的高效利用,故引用相对少的灌水量仍能得到较高的粮食产量;东南、华南沿海以种植高耗水的水稻为主,虽然降水丰富,但相对集中,不能令作物高比率利用,还需进行相当数量的灌水,同时,这里也是中国经济发展最快的地区,现代工业的发展使得对农业生产的管理相对粗放,如广东省高州水库灌区2010年平均灌水量达15 000 m^3/ha,单位耕地面积上对应的粮食产量仅6 150 kg,这些区域毛灌水量大而粮食单产偏低,故灌溉水粮食生产率较低;以种植水稻为主的西南和长江中下游地区是中国重要的农业生产区,虽然水资源丰富,但同时也多属于典型的季节性干旱区,粮食的相对高产必须以大量的灌溉水的投入为支撑;东北地区逐渐成为中国重要的商品粮输出区,以种植玉米及高耗水水稻、大豆为主,但受气候条件限制,复种指数低且降水资源相对不足,灌水损失率高,各主要灌区的毛灌水量为10 500~15 000 m^3/ha,所以该地区灌溉水粮食生产率有较大的提升空间.

2.2 灌溉水粮食生产率的时空分异特征

中国农业生产区集中于各流域片,灌溉水源以河道地表水为主,同一流域片的不同省区有相似的气候及其他农业生产条件,同时,由于社会发展对水资源需求增加使得各同一流域片的不同生产单元对灌溉水会存在竞争.所以中国灌溉水粮食生产率应该存在空间关联.且通过观察结合上述分析发现,灌溉水粮食生产率的不同值在空间上可能呈区域聚集分布.因此应用空间自相关分析方法来探寻中国灌溉水粮食生产率的时空分异模式.

根据全局空间自相关模型计算出了所研究的31个省区1998,2005及2010年灌溉水粮食生产率的全局Moran's I(Global Moran's Index)的估计值,表1列出了代表年Moran指数 I 估计值及其显著性.

表1　代表年中国灌溉水粮食生产率的 Moran 指数 *I* 估计值及检验

Tab.1　Moran's *I* test of *G* for a representative year in China

参数	1998	2005	2010
Moran's *I*	0.236 0	0.298 9	0.248 4
Z-Score	3.741 6	4.275 2	3.620 4
p-value	0.000 5	0	0.000 3

注:Moran's *I* 在3个年份的期望值均为 -0.033 3,方差均为0.006 0.

表1显示,所研究时间段(1998—2010年)的初始、中间及最末年的 Moran 指数 *I* 估计值相近且均大于0,对应的标准化统计量 Z-Score 均大于1.96,即高于标准正态分布曲线在显著水平为0.05时的临界值,说明计算结果均具有统计学意义.因此,从空间统计学角度可知,3个代表年各个省区的灌溉水粮食生产率在空间分布上具有较明显空间自相关关系,表现出具有相似值(大或小)的地区在地理空间上集中分布.由于数据原因,无法计算研究区间其他年份的 Moran's *I* 及其对应的 Z-Score 值,但是通过查究1998—2010年中国及各省区粮食生产和农业用水状况可以发现:13年来,全国及各省区的粮食产量均呈微小增加的稳定状态,全国总产量均处于 4.90×10^8 t 上下,最大值为2010年的 5.46×10^8 t,最小值为2003年的 4.33×10^8 t;全国及各省区的农业用水量亦基本稳定,全国总量维持在 $3\,670\times10^8$ m^3 上下,总体呈微弱减少趋势,最大值为1998年的 $3\,869\times10^8$ m^3,最小值为 $3\,431\times10^8$ m^3.全国及各省区粮食产量和农业用水量的总体格局没有剧烈变化,故可以认为,与所选取的代表年相比,其他年份省区灌溉水粮食生产率的空间分布规律不会有剧烈的改变.所以从宏观而言,中国大陆31个省区的灌溉水粮食生产率分布存在显著的空间聚集现象,即灌溉水粮食生产率高的省区趋于靠近,灌溉水粮食生产率低的省区也成片分布.灌溉水粮食生产率与区域的气候条件、广义水资源禀赋、农作物种类等自然因素关系密切,同时也受种植结构、农业生产与管理方式、农田水利设施及社会经济发展程度的影响,而这些要素在中国都表现出区域或流域的相似性,导致了灌溉水粮食生产率在空间上聚集.

采用空间联系局域指标进一步解析中国灌溉水粮食生产率区域分异的时空演变规律,利用式(2)计算出 Local Moran's *I* 指数,判断各省区所落入的属性区并对其进行显著性检验.

表2显示:落入 HL 的省区不多于2个,其余皆为 HH,LL 及 LH 区,其中20个省区位于 HH 和 LL 区;HH 省区集中分布于我国粮食生产集中的长江以北、黄淮海平原及西北地区东部,LL 区主要聚集于水资源丰富同时经济也相对发达的东南、华南、西南地区东部及东北地区,均表现出空间正相关,而属非典型区的 LH 及 HL 区在地理上无明显集中靠拢的趋势,这也进一步印证了全局空间自相关分析的结果.从1998—2010年的变化来看,HH,LL 的数量没有变化,LH 和 HL 区之间仅此消彼长了1个,因此,总体差异变化不大;HH 省区均为10个,但显著(*表示)HH 区由7个减少为4个,且有向西南推进的迹象,说明高灌溉水粮食的生产率区内的极化现象在减弱;LL 区的个数没有变化,而显著 LL 由无变为2个,且向华南聚集,表示高灌溉水粮食生产率区的聚集现象有消减趋势.空间局部自相关属性总体体现了地理条件、农业生产技术水平、经济条件及水资源禀赋等影响灌溉水粮食生产率因素的区域差异.

表2　1998和2010年31省区局部空间自相关属性及显著性

Tab.2　Local spatial autocorrelation parameters and statistical significance of 31 provinces in 1998 and 2010

省　区	1998	2010	省　区	1998	2010
黑龙江	LL	LL	江　苏	LH	LH
吉　林	LL	LL	江　西	HL	LL
辽　宁	LL	LH	湖　北	HH*	HL
内蒙古	LH	LH	湖　南	LL	LL
北　京	HH	HH	上　海	LL	LL
天　津	LH	LH*	浙　江	LL	LL
山　西	HH*	HH*	福　建	LL	LL
河　北	HH*	HH*	四　川	HH	HH
河　南	HH*	HH*	重　庆	LH	HH
山　东	HH*	HH*	云　南	LH	LH
安　徽	HH*	LH	贵　州	LL	LL
陕　西	HH*	HH*	西　藏	HL	HL
甘　肃	HH	HH	广　东	LL	LL*
宁　夏	LH	LH	广　西	LL	LL*
青　海	LH	LH	海　南	LH*	LH*
新　疆	LH*	LH*			

从各省区的具体情况来看,河南、陕西、山西、山东、河北、北京、湖北、甘肃及四川位于 HH 区,该9省区的平均灌溉水粮食生产率由1.34 kg/m^3 增加到了2.30 kg/m^3;粮食种植面积不大、总产有限的西藏位于 HL 区,灌溉水粮食生产率从1998年的

1.32 kg/m^3 增加到了 2010 年的 2.46 kg/m^3;广东、广西、湖南、贵州、福建、浙江、上海、吉林及黑龙江处 LL 区,平均灌溉水粮食生产率仅为 0.45 ~ 0.73 kg/m^3;而属于 LH 的海南、云南、江苏、宁夏、青海、新疆、内蒙古及天津相对分散分布. 地理条件、农业生产方式及水资源禀赋决定了区域间灌溉水粮食生产率的差异状况:海南省松涛灌区的年均降水量达 1 500 mm,3 年平均灌溉用水量为 19 200 m^3/ha,大量的灌溉水的浪费使其成为中国灌溉水粮食生产率最低的地区;江苏、宁夏种植大量的高耗水的水稻,故与其邻近的黄淮海地区相比,灌溉水粮食生产率存在一定的差距;内蒙古、新疆及青海作物生育期降水量稀少,粮食生产很大程度上依赖灌溉,再加上粮食作物的复种指数都较低,单位面积耕地产量低,所以灌溉水粮食生产率与周边地区有较大差异.

江西灌溉农业的粮食单产由 1998 年的 8 100 kg/ha 增加到 2010 年的 9 450 kg/ha,灌溉水粮食生产率由 0.89 kg/m^3 变为 1.01 kg/m^3,该省由 HL 区跳入 LL 区,这因受周边相似自然条件的省区的辐射,也与该省降水量减少、灌溉水投入的相对增加而灌溉水粮食生产率的变化不明显有关;重庆由 LH 变为 HH,因该市的灌溉水粮食生产率由 0.77 kg/m^3 增大到 1.89 kg/m^3,13 年间增幅超过 132%;安徽从显著 HH 变为 LH,该省的 1998 年的灌溉水粮食生产率为 0.97 kg/m^3,2010 年为 1.01 kg/m^3,灌溉水粮食生产率随时间基本无变化. 灌溉水粮食生产率的年际变化与周边省区同步与否体现在该省区局部自相关属性的变化上.

3 结 论

1)中国 1998,2005 及 2010 年灌溉水粮食生产率分别为 0.81,0.93 及 1.34 kg/m^3,各省区的灌溉水粮食生产率均呈历年增加的态势. 从代表年平均情况来看,灌溉水粮食生产率的高值以黄淮海平原为核心集中分布,其中河南和陕西的最大,超过了 2.10 kg/m^3,低值则分别为南方和东北地区,海南最小,仅 0.25 kg/m^3,区域差异很大. 灌溉水粮食生产率与区域的水资源禀赋、农业生产方式及经济发展状况关系密切.

2)由全局空间自相关分析得出,中国灌溉水粮食生产率在空间上存在显著的聚集现象,多年来该聚集趋势无明显变化,灌溉用水及粮食生产的区域格局没有发生大的改变. 对 1998 和 2010 年我国灌溉水粮食生产率进行局部空间自相关分析发现,13 年来,处于高 - 高(HH)、高 - 低(HL)、低 - 高(LH)、低 - 低(LL)的省区个数基本没有变化;高 - 高区内部差异在缩小,而低 - 低区有扩大的趋势;江西(由高 - 低区进入低 - 低区)、安徽(由高 - 高区进入低 - 高区)及重庆(由低 - 高进入高 - 高区)的变化幅度与其相邻省区不同步.

3)中国灌溉水粮食生产率的整体提升,说明农田基础设施及农业用水效率有所改善,对缺水地区而言有利于当地社会经济的发展和生态环境. 但是区域灌溉用水仍存在诸多问题:长江以南广大地区的水资源丰富,农业生产却投入了大量的灌溉水,这不仅造成水资源的极大浪费的同时消耗大量的引水成本,不利于社会资源的高效配置;黄淮海平原是水资源问题最严峻的地区,是国家粮食主产区,也是承当未来国家增产任务的核心区之一,在降水量不大的前提下,该地区的灌溉水粮食生产率很大,说明农业粮食水分生产率很高,但是该地区的灌溉水利用系数仅 0.52,可见该地区也依然存在提高灌溉用水利用率的潜力.

参考文献(References)

[1] 山仑,张岁岐. 能否实现大量节约灌溉用水? ——我国节水农业现状与展望[J]. 自然杂志,2006,28(2):71 - 74.
Shan Lun, Zhang Suiqi. Is possible to save large irrigation water? —The situation and prospect of water-saving agriculture in China[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(2): 71 - 74. (in Chinese)

[2] 中国水利网站[DB/OL]. http://www.chinawater.com.cn.

[3] 张明生,王丰,张国平. 中国农业用水存在的问题及节水对策[J]. 农业工程学报,2005,21(S1):1 - 6.
Zhang Mingsheng, Wang Feng, Zhang Guoping. Problems of agricultural water use in China and the strategies for saving water[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(S1): 1 - 6. (in Chinese)

[4] 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 CSAE, 2010, 26(6): 1 - 6. (in Chinese)

[5] Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Applica-

tion of virtual water trade theory in interregional grain allocation and transportation in China[J]. African Journal of Biotechnology, 10(80): 8463 - 18471.

[6] 刘鸽,赵文智. 农业水生产力研究进展[J]. 地球科学进展,2007,22(1):58 - 65.
Liu Hu, Zhao Wenzhi. Advances in researches of agriculture water productivity[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(1): 58 - 65. (in Chinese)

[7] 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.
Cui Yuanlai, Dong Bin, Li Yuanhua. Variation of water productivity in different spatial scales[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 45 - 51. (in Chinese)

[8] Harvey L D Danny. Upscaling in global change research [J]. Climatic Change, 2000, 44(3): 223 - 225.

[9] 杜文勇,何雄奎,胡振方,等. 不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):170 - 174.
Du Wenyong, He Xiongkui, Hu Zhenfang, et al. Effect of different irrigation technology on production of winter wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2):170 - 174. (in Chinese)

[10] Li Quanqi, Chen Yuhai, Liu Mengyu, et al. Effects of irrigation and straw mulching on microclimate charac teristics and water use efficiency of winter wheat in North China[J]. Plant Production Science, 2008, 11 (2): 161 - 170.

[11] 李全起,陈雨海,周勋波,等. 不同种植模式麦田水资源利用率及边际效益分析[J]. 农业机械学报,2010,41(7): 90 - 95.
Li Quanqi, Chen Yuhai, Zhou Xunbo, et al. Effects of different planting patterns on water use efficiency and marginal profits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 90 - 95. (in Chinese)

[12] 王浩,王建华,秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展,2004,15(1):123 - 128.
Wang Hao, Wang Jianhua, Qin Dayong. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1):123 - 128. (in Chinese)

[13] 李彬,曾庆祝. 灌区计算机监控系统与灌溉优化调度模型集成应用研究[J]. 排灌机械,2005,23(4):25 - 28.
Li Bin, Zeng Qingzhu. Study on integration between computer monitoring system and optimization model in irrigation channel distribution[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(4):25 - 28. (in Chinese)

[14] 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,2005,8(6):88 - 97.
Meng Bin, Wang Jinfeng, Zhang Wenzhong, et al. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 8(6): 88 - 97. (in Chinese)

[15] 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)

(责任编辑　徐云峰)