

虚拟水理论在河北省的应用

高太忠,庞会丛,余国山,杨 柳

(河北科技大学环境科学与工程学院,河北 石家庄 050018)

摘要 依据虚拟水的计量分析方法,对 2005 年河北省单一农产品虚拟水量和动物产品的虚拟水量进行了计算,得出河北省 2005 年城乡居民消费产品中的虚拟水含量为 484.72 亿 m^3 ,为实体水利用量的 2.3 倍;5 种动物产品虚拟水总含量为 121.17 亿 m^3 ,单位产品虚拟水含量平均值为 2 597.60 m^3/t ,9 种农产品虚拟水总含量为 363.55 亿 m^3 ,单位农产品的虚拟水含量平均值为 648.44 m^3/t ,具有较大的虚拟水应用潜力。依据 2005 年河北省的虚拟水、用水量及用水结构,分析了虚拟水战略对河北省的影响及其发展潜力。认为对于河北省这样的缺水地区,运用虚拟水手段可有效解决实体水调用的工程费用问题。建议密切结合自身的产业优势,发展高新技术产业、药业,适当从邻省调入粮食。

关键词 虚拟水;用水量;用水结构;河北省

中图分类号 :TV213 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2010)03-0079-04

Application of virtual water theory in Hebei Province

GAO Tai-zhong, PANG Hui-cong, YU Guo-shan, YANG Liu

(College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract : Using a quantitative analysis method, the virtual water quantities of single farm products and animal products in Hebei Province in 2005 were calculated. The virtual water quantity of urban and rural residential consumption products was 484.72 billion m^3 in Hebei Province in 2005. This was about 2.3 times the fresh water consumed. The virtual water of five animal products was 121.17 billion m^3 , and the average virtual water per product was 2 597.60 m^3/t . The virtual water of nine farm products was 363.55 billion m^3 , and the average virtual water per product was 648.44 m^3/t . There was large virtual water application potential. The influence of a virtual water strategy and its development potential in Hebei Province were analyzed according to virtual water, water quantity consumed, and water consumption structure in 2005. The engineering cost of water diversion can be resolved effectively by applying virtual water concepts in Hebei Province with water resources shortages. It is suggested that by using the industrial advantages in Hebei Province, high-tech industry and medicine enterprises can be developed, and food can be transferred from neighboring provinces properly.

Key words : virtual water; virtual water quantity; water consumption structure; Hebei Province

水资源短缺是我国北方地区 21 世纪面临的最主要的生态环境和社会经济问题之一,是制约区域社会经济发展和生态环境恢复、改善的瓶颈。据河北省水利厅 2007 年发布的水资源评价成果,河北省

多年平均水资源总量为 204.69 亿 m^3 ,是全国水资源总量的 0.72%。多年人均水资源量为 307 m^3 ,为全国人均水资源量的 13.97%^[1-2]。面对严峻的水资源现状,如何实现河北省水资源的可持续利用和均

基金项目 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2005409311);河北省环境工程重点学科项目(2009009)

作者简介 高太忠(1957—),男,河北行唐人,教授,博士,从事水资源利用、保护与管理研究。E-mail :taizhonggao@163.com

衡分配是亟待解决的问题,需要更新水资源问题的研究思路。虚拟水理论是解决区域水资源短缺问题的有效工具,通过水—粮食—贸易的关系体现。在水资源短缺地区,水资源短缺极大地影响区域内的粮食生产和安全。虚拟水贸易是一种新的水资源供应方式,可以作为一种调节工具来实现区域的粮食安全和水资源安全^[3]。

1 虚拟水的概念

虚拟水是英国学者 Tony Allan 于 20 世纪 90 年代提出的新概念^[4],是指生产产品和服务所需要的水资源^[5]。虚拟水不是真正意义上的水,而是以‘虚拟’的形式包含在产品中的看不见的水,也被称为“嵌入水”和“外生水”^[4-9]。虚拟水概念是一个类似于‘水资源’的元概念。

虚拟水战略是指贫水国家和地区通过贸易方式从富水国家和地区购买水密集型农产品(尤其是粮食)来获得水和粮食安全^[4-5,8-12]。国家和地区之间的农产品贸易,实际上是以虚拟水的形式在进口或出口水资源^[6,9-10]。从虚拟水的概念可以看出,虚拟水以‘无形’的形式存在于其他商品中,相对于现实存在的水资源,其便于运输的特点,使这种贸易变成了一种缓解水资源短缺的途径。

虚拟水战略是平衡区域尺度和水赤字的有效工具和战略措施^[13-14]。对于那些水资源紧缺的地区来说,虚拟水贸易不仅提供了水资源的一种替代供应途径,而且不会产生恶劣的环境后果,能较好地减轻局地水资源紧缺的压力^[5,8]。而对于水资源丰富的国家,通过虚拟水的出口同样可以获益,增强其经济实力。因此,国家与国家之间虚拟水交易被用作提高全球水利用效率和缺水地区获得水安全的一个重要工具。

农业用水是目前我国水资源消耗的主要形式。通过省际农产品进出口情况,可以了解目前‘虚拟水’在各地区流通的大致情况,因为农产品是水密集型商品,其中隐含了大量的‘虚拟水’。全国除台湾、澳门、香港外 31 个省(市、区)中,有 20 个省(市、区)的农产品进口大于出口,表现出进口“虚拟水”;10 个省(市、区)农产品出口量大于进口量,表现为出口“虚拟水”。

2 虚拟水的计量方法

2.1 农作物产品虚拟水含量计算

单一农作物产品虚拟水含量可以根据以下公式计算：

$$V_{cn} = \frac{W_{cn}}{Y_{cn}} \tag{1}$$

式中： V_{cn} 为区域 n 作物 c 单位质量的虚拟水含量， m^3/t ； W_{cn} 为区域 n 作物 c 的需水量， m^3/hm^2 ； Y_{cn} 为区域 n 作物 c 的产量， t/hm^2 ^[4-5,11,15-17]。

假设农作物本身所包含的水分可以忽略不计，则作物需水即是作物在生长发育期间的累积蒸发蒸腾水量：

$$ET_C = K_C ET_0 \tag{2}$$

式中： ET_C 为累积蒸发蒸腾水量， t ； ET_0 为参考作物蒸发蒸腾水量， t ； K_C 为作物系数^[4-6,8,11,15-17]。

式(2)计算 ET_0 时,忽略了作物类型、作物发育和管理措施等因素对作物需水的影响,可根据粮农组织(FAO)推荐的标准彭曼公式计算修正,其计算过程如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} v_2 (P_a - P_d)}{\Delta + \gamma(1 - 0.3 v_2)} \tag{3}$$

式中： Δ 为蒸气压力曲线斜率， $kPa/^\circ C$ ； R_n 为作物表面的净辐射量， MJ/m^2 ； G 为土壤热流量， MJ/m^2 ； γ 为干湿度常量， $kPa/^\circ C$ ^[5-6,11,15-19]； t 为平均气温， $^\circ C$ ； v_2 为离地面 2 m 高处的风速， m/s ； P_a 为饱和状态下的蒸气压力， kPa ； P_d 为实际蒸气压力， kPa 。

2.2 动物产品虚拟水含量计算

要将活动物的虚拟水含量在动物产品间进行分配才能计算出不同动物产品的虚拟水含量(图 1)^[4-6,11]。动物产品的虚拟水含量依赖于动物的类型、动物的饲养结构和动物成长的自然地理环境(气候条件)^[12,16-17]。其虚拟水含量计算分两个步骤：①计算活动物一生消耗的虚拟水量(包括饲料生产用水、生活饮用水、清洗圈舍用水)；②活动物的虚拟水量加上加工用水在该动物的不同产品之间进行分配^[6]。文献^[4-5,11-12,15-19]给出了第 1 类至第 4

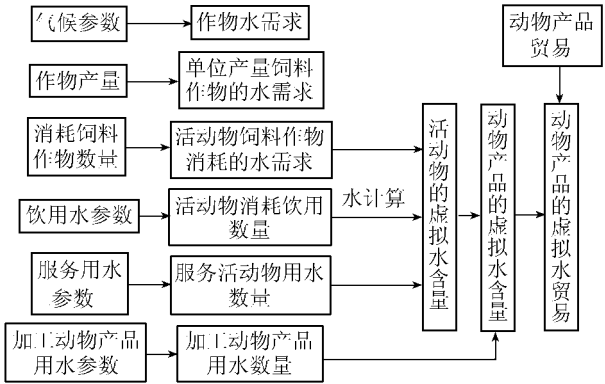


图 1 动物产品虚拟水计算流程

类动物产品及相关问题的概念,即直接由活动物提供的产品称为第 1 类动物产品,经进一步加工变成第 2 类动物产品,第 1 类动物产品的虚拟水含量包括活动物的虚拟水和为得到不同第 1 类初级产品加工所需要的水资源量。可以引进产品比例因子和价值比例因子来计算在不同的第 1 类产品间分配活动物的虚拟水含量和加工需水。产品比例因子定义为从活动物得到的不同第 1 类动物产品的数量比例,价值比例因子是第 1 类产品的市场价值与所有第 1 类产品市场价值总和的比例。部分第 1 类产品的虚拟水和加工用水构成了活动物的虚拟水,第 2 类初级产品间用水的分配同样采用产品比例因子和价值比例因子进行分配,第 3、4 类动物产品的虚拟水含量分配依此类推。

3 计算和分析

3.1 单一农产品虚拟水量计算

a. 作物需水量。根据陈玉民等^[20]的我国主要作物需水量等值线图等研究结果,作物需水量(*ET*)调查结果见表 1。

表 1 海河流域作物需水量调查结果 mm			
作物类别	需水量	作物类别	需水量
小麦	519	粮类	460
玉米	532	油料作物	366
其他谷物	400	棉花	586
大豆	425	蔬菜	813
薯类	362	其他作物	449

b. 作物产量。根据河北经济年鉴 2005 年统计数据^[21],2005 年河北省各类作物单产量统计结果见表 2。

表 2 2005 年河北省各类作物单产统计结果 kg/hm ²			
作物类别	单位产量	作物类别	单位产量
谷物	4371	麻类	3182
薯类	3195	烟草	2703
油料	2732	蔬菜	58541
豆类	1537	瓜果	45484
棉花	1006		

c. 虚拟水含量计算。按照前述方法,首先计算单一农作物初级产品生产的虚拟水含量,然后根据相关统计资料 and 知识,获得各类作物单产量,最终得到单位产品的虚拟水含量(表 3)。需要指出的是,同虚拟水相比较,最终产品中的实体水和加工过程中所需要的实体水总是忽略的(如西红柿中的水)。

3.2 动物产品的虚拟水计算

Hoekstra 等^[22]根据 FAO 和世界贸易组织(WTO)提供的数据资料,按照世界 100 多个国家单位重量动物产品的虚拟水含量估算中有关中国部分贡献度

大小的估计结果,计算 2005 年河北省居民生活消费的动物产品中的虚拟水含量(表 3)。

表 3 2005 年河北省城乡居民消费的虚拟水含量							
产名 名称	总产量/ 万 t	单位产品 虚拟水含量/ (m ³ ·kg ⁻¹)	虚拟水 总量/ 亿 m ³	产名 名称	总产量/ 万 t	单位产品 虚拟水含量/ (m ³ ·kg ⁻¹)	虚拟水 总量/ 亿 m ³
谷物	817.60	1.107	271.45	瓜果	159.80	0.060	2.86
薯类	31.50	0.378	35.69	猪肉	133.40	1.273	50.95
油料	50.90	0.447	6.82	牛肉	11.21	7.011	23.58
豆类	17.10	0.922	4.72	羊肉	9.61	2.638	7.60
棉花	19.20	1.942	11.20	牛奶	113.45	1.029	35.03
麻类	0.20	0.380	0.29	淡水鱼	12.88	1.037	4.01
烟草	0.30	0.554	0.55				
蔬菜	2155.90	0.046	29.97	合计			484.72

从表 3 可见,2005 年河北省主要农产品和动物产品的虚拟水总量为 484.72 亿 m³,其中,5 种动物产品总产量为 280.55 万 t,虚拟水总含量为 121.17 亿 m³,单位产品虚拟水含量平均值为 2 597.60 m³/t; 9 种农产品的总产量为 1096.6 万 t,虚拟水总量为 363.55 亿 m³,单位农产品的虚拟水含量平均值为 648.44 m³/t,单位动物产品虚拟水含量约为单位农产品虚拟水含量的 4 倍。谷物的虚拟水总量达 271.45 亿 m³,占农产品虚拟水总量的 74.7%。

在河北省这样一个缺水大省,由于农业灌溉节水技术的采用,谷物的单位质量虚拟水含量应该接近 50%,所以计算结果可能有偏差。9 种农产品中,尽管蔬菜的单位质量虚拟水含量很低,但是单产很高,单位面积需水量达 813 mm,是 9 种农产品中需水量最大的。蔬菜作为一种日常生活食品,其需求量大是造成种植面积大的原因,也与河北省的地理条件有关。但是,如果适当压缩蔬菜的种植面积,并从邻近地区进口部分蔬菜,可以减少水资源的消耗。河北省作为全国 14 个粮食主产省之一,每年出省粮食约在 45 万 t 以上。河北省可调整粮食贸易结构,适当减少单位产品虚拟水含量较高的谷物和棉花作物。

3.3 虚拟水与用水结构分析

依据 2005 年河北省虚拟水与用水量计算结果(表 4),分析河北省虚拟水与用水结构,对虚拟水战略在河北省的应用以及河北省的产业结构调整都具有指导意义。

表 4 2005 年河北省虚拟水与用水量计算结果							
总人 口/ 万人	虚拟水			用水量			
	总量/ 亿 m ³	年人均/ m ³	农业/ 亿 m ³	工业/ 亿 m ³	生活/ 亿 m ³	总量/ 亿 m ³	年人均/ m ³
6 851	484.72	707.5	161.76	27.34	23.08	212.18	307

2005 年河北省人均用水量为 307 m³,由农产品和动物产品计算得出的人均虚拟水约为 707.5 m³,人均虚拟水是人均用水量的 2.3 倍。农产品虚拟水

含量大于农业用水量,主要是因为单位质量农产品虚拟水含量并未包含最终产品中的实体水和加工过程中所需要的实体水。动物产品的虚拟水总量很大,一方面是因为动物产品虚拟水含量并非严格按照资料进行计算,而是采用 Chapagain 和 Hoekstra 的研究结果和虚拟水计算参考值;另一方面,动物产品的虚拟水包含了多种来源,而且动物产品具有储水功能,可能包含了多年的累积消耗水量。

笔者只计算了农产品和动物产品的虚拟水,并没有计算工业产品的虚拟水。但是仅仅从这两个方面的计算结果来看,生产和加工这些产品消耗了大量的水资源。由于工业产品的虚拟水含量计算尚处于起步阶段,可借鉴的工业原材料虚拟水的数据较少,因此,计算模型还有待完善。从虚拟水及用水 2 个方面都可以看出,农业用水高达 161.76 亿 m^3 ,而河北省 2005 年的水资源可利用总量仅为 170 亿 m^3 ,基本满足农业用水的需要。

在虚拟水战略中,对于缺水地区,最理想的产业结构应该是让有限的水资源用于耗水量小且产品附加值高的行业。低附加值行业一般是农业,如果城市化水平不高,农村人口众多,考虑到就业压力及人民生活等问题,压缩农业的可能性不大。河北省是农业大省,只能依靠提高水资源利用效率节约水资源,因此实施虚拟水战略必须考虑地区的城市化发展水平。从省域经济综合竞争力角度看,河北省列居全国第 12 位,但是采用虚拟水战略的潜力仍然不足。特有的地理位置制约了河北省很多方面的发展。

4 结论与讨论

笔者对河北省 2005 年主要农产品和动物产品的虚拟水计算得出:虚拟水总量为 484.72 亿 m^3 ,其中,5 种动物产品虚拟水总含量为 121.17 亿 m^3 ,单位产品虚拟水含量平均值为 2 597.60 m^3/t ;9 种农产品虚拟水总含量为 363.55 亿 m^3 ,单位农产品的虚拟水含量平均值为 648.44 m^3/t 。人均虚拟水含量为实体水利用量的 2.3 倍。产品中所包含的虚拟水总量是相当可观的,而且这部分水是可以贸易进行流通。虚拟水贸易提供了水资源的一种替代供应方式,并且该方式不会产生恶劣的环境后果,可有效解决实体水调用的工程费用问题。虚拟水战略的实际应用中受地区的经济实力、城市化发展水平、生态平衡等许多因素的影响。贫水地区可以通过购买水密集型产品来替代自己生产,从而缓解水资源短缺的压力。尽管河北省是农业大省,粮食作为战略性资源,但仍可适当考虑通过制定和实施虚拟水进口战略,同时结合自身的产业优势,发展轻工业、药业,适

当从邻省调入粮食。

参考文献:

- [1] 程国栋.虚拟水:中国水资源安全战略的新思路[J].中国科学院院刊,2003(4):260-265.
- [2] 刘雅翠.河北人均和亩均水资源量为全国 1/7 水资源形势严峻[EB/OL]. [2007-03-23]. <http://www.heb.chinanews.com.cn/news/shfz/2007-03-23/13828.shtml>.
- [3] QADIR M, BOERS T M, SCHUBERT S, et al. Agricultural water management in water-starved countries: challenges and opportunities[J]. Agricultural Water Management, 2003, 62: 165-185.
- [4] 张兴榆,曹明明,雷敏.虚拟水域虚拟水战略研究进展[J].水资源研究,2006,27(2):30-32.
- [5] 徐中民,龙爱华,张志强.虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用[J].地理学报,2003,58(6):861-869.
- [6] 于茜,瓦哈甫·哈力克,吴亚妮,等.虚拟水理论及其在新疆的应用[J].农业系统科学与综合研究,2007,23(2):141-145.
- [7] 崔亚楠.虚拟水理论与北京地区用水结构分析[J].北京水利,2005(4):33-35.
- [8] 狄乾斌,韩增林,刘桂春.基于虚拟水消费的水足迹计算——以大连市为例[J].云南地理环境研究,2006,18(5):28-33.
- [9] 邢芳.解决水危机的新领域:虚拟水战略[J].科技资讯,2008(3):153.
- [10] 吴普特,冯浩.中国节水农业发展战略初探[J].农业工程学报,2005,21(6):152-157.
- [11] 杨静.辽西地区虚拟水战略研究[D].辽宁:辽宁师范大学,2006.
- [12] 王新华,张志强,龙爱华,等.虚拟水研究综述[J].中国农村水利水电,2005(1):27-30.
- [13] ZIMMER D, RENAULT D. Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results [C]//HOEKSTRA A Y. Virtual Water Trade. IHE Delft 2003:93-107.
- [14] DABO GUAN, KLAUS HUBACEK. Assessment of regional trade and virtual water flows in China [J]. Ecological Economics, 2007(1):159-170.
- [15] 龙爱华,徐中民,张志强.虚拟水理论方法与西北 4 省(区)虚拟水实证研究[J].地球科学进展,2004,19(4):577-584.
- [16] 李吉玖,徐海量,张占江,等.不同情境下的虚拟水战略对塔里木河流域水资源和生态环境的影响[J].干旱区资源与环境,2008,27(7):120-125.
- [17] 李吉玖,徐海量,叶茂,等.塔里木河流域 2003 年虚拟水计算初探[J].水土保持通报,2007,27(3):88-92.
- [18] 吴晓华.黑龙江省虚拟水研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2007.

(下转第 86 页)

参考文献：

[1] CROWLY J M. Biogeography [J] . Canadian Geographer,1967, 11(4) :12-26.

[2] 孟伟,张远,郑丙辉. 水生态区划方法及其在中国的应用前景 [J] . 水科学进展,2007,18(2) :293-300.

[3] OMERNIK J M. Ecoregions of the conterminous United States (Map Supplement) [J] . Annals of the Association of American Geographers,1987,77(1) :118-125.

[4] DAVIES P E. Development of a national river bioassessment system, AUSRIVAS in Australia [C]//WRIGHT J F. Assessing the Biological Quality of Fresh Waters-RIVPACS and Other Techniques. Freshwat Biol,2000 :113-124.

[5] HEMSLEY F B. Classification of the biological quality of rivers in England and Wales [C]//WRIGHT J F. Assessing the Biological Quality of Fresh Waters - RIVPACS and Other Techniques. Freshwat Biol,2000 :55-69.

[6] Austrian Standards(O) NORM M 6232. Guidelines for the ecological survey and evaluation of flowing surface waters[S] . Vienna :Austrian Standards Institute,1997.

[7] ROHM C M, GIESE J W, BENNETT C C. Evaluation of an aquatic ecoregion classification of streams in Arkansas [J] . Journal of Freshwater Ecology,1987,4 :127-140.

[8] HUGHES R M, REXSTAD E, BOND C E. The relationship of aquatic ecoregions river basins and physiographic provinces to the ichthyogeographic regions of Oregon[J] . Copeia,1987(2) : 423-432.

[9] WHITTIER T R, HUGHES R M, LARSEN D P. Correspondence between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon[J] . Canadian Journal of Fisheries

and Aquatic Sciences,1987,45(9) :1264-1278.

[10] LARSEN D P, DUDLEY D R, HUGHES R M. A regional approach for assessing attainable surface water quality : an Ohio case study [J] . Journal of Soil and Water Conservation, 1988,43(6) :171-176.

[11] OMERNIK J M. Ecoregions : a spatial framework for environmental management [C]//DAVIS W S. Biological Assessment and Criteria : Tools for Water Resource Planning and Decision Making. Boca Raton :Lewis,1995 :49-62.

[12] HARDING J S, WINTERBOURN M J. An ecoregion classification of the South Island New Zealand[J] . Journal of Environmental Management,1997,51(2) :275-287.

[13] WELLS F, METZELING L, NEWALL P. Macroinvertebrate regionalisation for use in the management of aquatic ecosystems in Victoria, Australia [J] . Environmental Monitoring and Assessment, 2002,74 :271-294.

[14] YOUNG S P, TAE S C, INN S K, et al. Hierarchical community classification and assessment of aquatic ecosystems using artificial neural networks [J] . Science of the Total Environment, 2004,327(8) :105-122.

[15] GRAEF F, SCHMIDT G, SCHRODER W, et al. Determining ecoregions for environmental and GMO monitoring networks [J] . Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 108 (7) :189-203.

[16] WHITTIER T, HUGHES R, LARSEN D. Correspondence between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in oregon [J] . Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,1988,45 :1264-1278.

[17] 孟伟,张远,郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究 [J] . 环境科学学报,2007,27(6) :911-918.

(收稿日期 2009-09-11 编辑 徐 娟)

(上接第 72 页)

[19] HOPPER B. Information management behavior of Australian catchment managers [J] . Water International, 2001,26(4) : 513-526.

[20] HOPPER B. Design and implementation experience of an Australian prototype catchment information exchange program [J] . Water International, 2002,27(4) :568-577.

[21] BARROW C. River basin development planning and management : a critical review [J] . World Development,1998, 26(1) :171-186.

[22] MCCOOL S F, GUTHRIE K. Mapping the dimensions of successful public participation in messy natural resources management situations [J] . Society and Natural Resources, 2001,14(4) :309-320.

[23] FALKENMARK M, GOTTSCHALK I, LUNDQVIST J, et al. Towards integrated catchment management : increasing the dialogue between scientists, policy-makers and stakeholders [J] . Water Resource Development,2004,20(3) :297-309.

[24] 杨立信,孙金华. 国外水资源一体化管理的最新进展 [J] . 水利经济,2006,24(4) :20.

(收稿日期 2008-10-31 编辑 高渭文)

(上接第 82 页)

[19] 李明. 长春市 1994—2004 年水足迹研究 [D] . 沈阳 :东北师范大学,2007.

[20] 陈玉民. 中国主要作物需水量与灌溉 [M] . 北京 :水利电力出版社,1995.

[21] 河北省人民政府办公厅,河北省统计局,河北省社会科学院. 河北经济年鉴 [M] . 北京 :中国统计出版社,2006.

[22] 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 :35-48.

(收稿日期 2009-02-15 编辑 徐 娟)

