

虚拟水战略中的蓝水和绿水细分研究

马育军^{1,2}, 李小雁^{1,2}, 徐霖², 王卫², 张晓影²

1. 北京师范大学; 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875

摘要 对虚拟水资源中的蓝水和绿水进行细分, 在此基础上评价通过实施虚拟水战略节约的能被农牧业生产之外其他社会经济部门利用的水资源量, 是在更广泛范围内进行区域水资源优化配置的重要前提。通过构建蓝水绿水细分模型估算了虚拟水战略中的蓝水资源量和绿水资源量, 并以北京市为例开展实证研究。结果表明, 北京市主要粮食作物生长消耗的虚拟水中, 在考虑土壤水储存和不考虑土壤水储存两种情况下, 2007 年消耗的蓝水资源量分别为 6.21、6.29 亿 m^3 , 均明显多于同期消耗的绿水资源量; 1999 年以来基于粮食贸易输入的虚拟水资源量和蓝水资源量迅速增加, 其中蓝水输入量最高已达 38.80 亿 m^3 , 而 2001—2007 年基于口粮贸易的蓝水输入量占相应实体水资源量的比例均高于 50%。因此, 近年来虚拟水战略在缓解北京市水短缺危机方面已发挥了重要作用, 而对虚拟水资源中蓝水和绿水进行细分可为在更广泛范围内进行区域水资源优化配置提供参考。

关键词 蓝水; 绿水; 虚拟水战略

中图分类号 P33

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)04-0047-08

Subdivision of Blue Water and Green Water in the Virtual Water Strategy

MA Yujun^{1,2}, LI Xiaoyan^{1,2}, XU Lin², WANG Wei², ZHANG Xiaoying²

1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology; Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract As an important basis for the rational allocation of regional water resources in wider fields, it is necessary to subdivide virtual water resources into blue water and green water, and evaluate the water resource amounts saved through the virtual water strategy that can be made available for other industries except agriculture and stockbreeding. This paper evaluates the blue water resource and the green water resource in the virtual water strategy in Beijing, according to the subdivision model of blue water and green water. The results show that within the virtual water resources consumed by main crops, in cases of taking into consideration of soil water storage and not taking into consideration of soil water storage, the blue water resources consumed by main grains in Beijing are $6.21 \times 10^8 \text{m}^3$ and $6.29 \times 10^8 \text{m}^3$ in 2007, respectively, both more than the green water resources consumed by main grains at the same time. The virtual water import and the blue water import through grain trade are increased significantly since 1999, and the highest amount of the blue water import is $38.80 \times 10^8 \text{m}^3$, and the proportion of the blue water import through food trade in the corresponding real water resource is higher than 50% in Beijing from 2001 to 2007, which indicates that the virtual water strategy has played an important part in solving the problem of water scarcity in Beijing during the past several years, and the subdivision of the blue water and the green water in the virtual water strategy can provide some helpful insight for the rational allocation of regional water resources in wider fields.

Keywords blue water; green water; virtual water strategy

收稿日期: 2009-12-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2007BAC30B02); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0056); 北京市优秀人才培养资助项目(20071D0503100298)

作者简介: 马育军, 博士研究生, 研究方向为水土资源可持续利用、水资源管理, 电子信箱: yjma@ires.cn; 李小雁(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S110006258M), 教授, 研究方向为生态水文、水文与水资源, 电子信箱: xlyli@ires.cn

水资源作为基础性的自然资源和战略性的经济资源,是一个国家综合国力的有机组成部分。而目前的水资源评价一般仅包括可见的并可被人类直接利用的水资源,即只对易于被工程开发利用的可更新的地表水和地下水进行评价^[1],同时通常仅对研究区域内的水资源进行评价并在此基础上寻求解决水资源问题的方法。虚拟水战略作为优化配置实体水资源之外缓解区域水短缺危机的重要途径之一,目前已经引起专家学者及政府部门的广泛关注、研究和应用。由于水资源存在形式(蓝水、绿水)的影响,通过实施虚拟水战略节约的水资源并非全部能够被其他社会经济部门利用,有必要对虚拟水资源中的蓝水和绿水进行细分,并在此基础上科学评价通过实施虚拟水战略节约的能被其他社会经济部门利用的水资源量,为在更宽广的范围内进行区域水资源的优化配置提供参考。

1 蓝水、绿水和虚拟水的基本内涵

1.1 蓝水和绿水划分

“蓝水”(blue water)和“绿水”(green water)概念由 Falkenmark 于 1993 年针对雨养农业和粮食安全而首次提出^[2]。降水在陆地生态系统中被分割成蓝水和绿水两部分,其中蓝水是降水中形成地表水和地下水的部分,是可见的液态水流,包括河流、湖泊及地下水含水层中的水;绿水是降水渗入下渗到非饱和土壤层中用于植物生长的水,是垂向进入大气的不可见水^[2-4]。

绿水作为陆地生态系统中土壤-植被系统耗水的主要来源,对于维持陆地生态系统和雨养农业粮食安全具有重要作用^[3,5]。传统意义上仅将蓝水作为水资源,限制了人类对水资源的全面利用;绿水概念的提出拓宽了水资源的范畴,更新了水资源的思维,引起专家学者的广泛关注并开展了多方面的理论探讨与实证研究^[6-12]。

1.2 虚拟水与虚拟水战略

“虚拟水”(virtual water)概念由 Allan 于 1993 年提出^[13],是指包含在世界粮食贸易中的水资源量,后来延伸到指隐含于水密集型产品中的水资源量。目前,虚拟水被定义为“生产商品和服务所需要的水资源数量”^[14]。虚拟水不是真实意义上的水,而是以虚拟形式包含在产品中的看不见的水,因此也被称为嵌入水或外生水^[15]。由产品贸易引起虚拟水的转移就是虚拟水贸易,而虚拟水战略则是指贫水国家或地区通过贸易方式从富水国家或地区购买水密集型产品(尤其是粮食)获得水和粮食安全。

以往人们对水和粮食安全都习惯于在问题发生的区域范围内寻求解决方案,虚拟水战略从系统的角度出发分析与问题相关的各种影响因素,并从问题发生的范围之外找寻解决问题的应对策略。目前,虚拟水已经成为国际前沿研究领域^[16],诸多学者针对虚拟水的内涵、估算等开展了多方面的理论和实证研究^[17-22],当前许多国家也正在以虚拟水的形式解决国内水资源短缺问题^[23-24]。

1.3 虚拟水战略中蓝水和绿水细分的意义

从蓝水和绿水的划分可以看出,对某一特定区域而言,完整意义上的水资源应当包括蓝水和绿水两部分,并且只有蓝水部分可以被农牧业生产以外的其他社会经济部门(工业生产、航运交通等)利用。缺水国家或地区通过虚拟水战略节约的水资源当中很大一部分是以绿水资源的形式存在,而这部分绿水资源对其他社会经济部门的发展没有直接作用,所以对虚拟水资源中的蓝水资源部分进行精确评价是合理运用虚拟水战略的重要前提,也是目前国内外相关研究中极少涉及的领域。Novo 等^[25]对西班牙基于粮食贸易的虚拟水资源中的蓝水与绿水进行了细分,结果表明西班牙与粮食贸易相关的蓝水输出量在干旱年份高达 1.59 亿 m³。但目前国内尚未开展虚拟水战略中的蓝水与绿水细分研究。

北京市作为世界上严重缺水的大城市之一,2007 年按全市总人口计算人均水资源量仅为 135m³,属于资源型重度缺水地区,同时也存在工程型缺水和水质型缺水问题。1999 年以来,北京市及其周边地区发生持续干旱,主要地表水源密云水库、官厅水库的可利用来水量迅速减少,平原区地下水埋深不断下降。另一方面,北京市目前主要通过南水北调、地表水-地下水-应急水源-再生水联合调度、雨洪利用、节水措施等传统手段解决水短缺问题。已有研究表明^[26],北京市作为一个农产品虚拟水净输入地区,年平均虚拟水净输入量约为 2.37 亿 m³,因此有必要在传统手段之外找寻缓解北京市水短缺危机的新途径。

2 研究方法

2.1 逐旬作物需水量计算

作物需水量(Crop Water Requirements, CWR)主要借助联合国粮农组织(FAO)推荐的 CropWat 4 Windows 模型进行计算,并在原有模型基础上做如下改进:利用逐年月值气象数据代替多年平均月值气象数据计算每年的作物需水量,结合研究区实际对默认作物系数进行订正。

由于 CropWat 4 Windows 模型无法计算稻谷的作物需水量,因此研究区稻谷生长需水量主要参考中国农业科学院海河流域作物需水量数据库中的相关成果,并结合北京市历年降水频率数据修正得到^[27]。

2.2 逐旬有效降水量计算

农业方面的有效降水量(Effective Rainfall, ER)是指旱作物种植条件下,用于满足作物蒸发蒸腾需要的降水量,它不包括地表径流和渗漏至作物根区以下的部分,也不包括淋洗盐分所需要的降水深层渗漏部分^[28-30]。本研究主要根据 CropWat 4 Windows 模型中推荐的计算逐月有效降水量的经验方法修正得到逐旬有效降水量计算公式,并将计算时间尺度细化至逐旬,以提高计算结果的准确性。

$$ER(q, c, i) = \begin{cases} 0.5 TR(q, c, i) - 1.67 & TR(q, c, i) < 16.7 \\ 0.7 TR(q, c, i) - 5.00 & TR(q, c, i) \geq 16.7 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $ER(q, c, i)$ 、 $TR(q, c, i)$ 分别为 q 地区 c 种作物生长季当

中第 i 旬的逐旬有效降水量 (mm)、逐旬降水总量 (mm)。

2.3 蓝水和绿水细分模型

蓝水蒸散发和绿水蒸散发分别被定义为作物总蒸散发当中由蓝水和绿水供给的部分^[25]。对于灌溉农业,作物需水当中的绿水部分和蓝水部分可由下式计算得到^[25]:

$$\begin{cases} ET_g(q, c, i) = \min(CWR(q, c, i), ER(q, c, i)) \\ ET_b(q, c, i) = \max(0, CWR(q, c, i) - ER(q, c, i)) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $ET_g(q, c, i)$ 、 $ET_b(q, c, i)$ 分别为 q 地区 c 种作物第 i 旬生长消耗的绿水量 (mm)、蓝水量 (mm), $CWR(q, c, i)$ 为 q 地区 c 种作物第 i 旬的生长需水量 (mm)。

对于作物整个生长季消耗的绿水和蓝水则要区分为考虑土壤水储存和不考虑土壤水储存两种情况分别进行计算:前者是指第 i 旬多于作物需水量的有效降水剩余部分可以保存在土壤根层中供第 $i+1$ 旬时作物生长利用;后者指每一旬多于作物需水量的有效降水剩余部分将自动流失,无法供下一旬作物生长利用。考虑土壤水储存和不考虑土壤水储存两种情况下,作物整个生长季消耗的绿水和蓝水计算公式为:

$$\begin{cases} ET_g(q, c) = \min\left(\sum_{i=1}^n CWR(q, c, i), \sum_{i=1}^n ER(q, c, i)\right) \\ ET_b(q, c) = \max\left(0, \sum_{i=1}^n CWR(q, c, i) - \sum_{i=1}^n ER(q, c, i)\right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} ET_g(q, c) = \sum_{i=1}^n \min(CWR(q, c, i), ER(q, c, i)) \\ ET_b(q, c) = \sum_{i=1}^n \max(0, CWR(q, c, i) - ER(q, c, i)) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $ET_g(q, c)$ 、 $ET_b(q, c)$ 分别为 q 地区 c 种作物整个生长季消耗的绿水量 (mm)、蓝水量 (mm), n 为利用旬数表示的 c 种作物的生长季长度。

利用上述作物需水量计算结果并结合作物单位面积产量数据,根据下式可计算得到生长单位质量各种作物需要消耗的绿水资源量和蓝水资源量:

$$\begin{cases} V_g(q, c) = \frac{10 ET_g(q, c)}{Y_a(q, c)} \\ V_b(q, c) = \frac{10 ET_b(q, c)}{Y_a(q, c)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $V_g(q, c)$ 、 $V_b(q, c)$ 分别为 q 地区生长单位质量 c 种作物消耗的绿水资源量 (m^3/kg)、蓝水资源量 (m^3/kg), $Y_a(q, c)$ 为 q 地区 c 种作物的单位面积产量 (kg/hm^2)。

根据式(5)计算结果和作物总产量数据,可计算得到特定区域生长某种作物消耗的绿水资源总量和蓝水资源总量为

$$\begin{cases} CWU_g(q, c) = V_g(q, c) Y_t(q, c) \\ CWU_b(q, c) = V_b(q, c) Y_t(q, c) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $CWU_g(q, c)$ 、 $CWU_b(q, c)$ 分别为 q 地区生长 c 种作物消耗的绿水资源总量 (m^3)、蓝水资源总量 (m^3), $Y_t(q, c)$ 为 q 地区 c 种作物的总产量 (kg)。

2.4 虚拟水贸易量估算

虚拟水贸易量的准确估算主要依赖于对产品贸易量的

分析和对单位产品虚拟水含量的计算。对北京市而言,由于缺乏历年粮食作物的贸易数据,本研究主要结合已有相关研究成果,根据以下两式分别计算全市逐年的粮食进口量和口粮进口量:

$$IG(q, j) = \max(0, 400 P(q, j) - Y_t(q, j)) \quad (7)$$

$$IF(q, j) = \max(0, 260 P_r(q, j) + 140 P_u(q, j) - Y_t(q, j)) \quad (8)$$

式中, $IG(q, j)$ 为 q 地区第 j 年的粮食进口量 (kg), $P(q, j)$ 为 q 地区第 j 年的总人口 (人), 400 为人均粮食消费标准 ($\text{kg}/\text{人}$), $Y_t(q, j)$ 为 q 地区第 j 年的粮食总产量 (kg); $IF(q, j)$ 为 q 地区第 j 年的口粮进口量 (kg), $P_r(q, j)$ 、 $P_u(q, j)$ 分别为 q 地区第 j 年的农村和城市人口数量, 260 和 140 分别为农村人均口粮消费标准和城市人均口粮消费标准 ($\text{kg}/\text{人}$), 暂住人口按照农村人均消费标准进行计算。

3 北京市主要粮食作物生长消耗蓝水与绿水计算

3.1 不同作物虚拟水含量对比

北京市 1980—2007 年冬小麦、稻谷、玉米、薯类和大豆 5 种主要粮食作物在生长需水得到完全满足条件下的逐年虚拟水含量计算结果如图 1 所示,受气候因素和作物产量的综合影响,北京市近 30 年来 5 种主要粮食作物虚拟水含量的年际波动幅度较大,但总体变化趋势为 1980—1995 年不断减小、1996 年以来逐渐增加;而从各种作物多年平均虚拟水含量看,大豆虚拟水含量最高 ($1.54 \text{m}^3/\text{kg}$),玉米虚拟水含量最低 ($0.88 \text{m}^3/\text{kg}$),这与已有相关研究成果的结论基本一致^[31]。

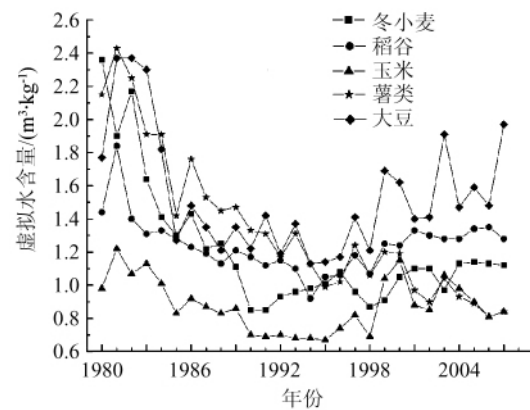


图 1 作物需水完全满足条件下北京市主要粮食作物虚拟水含量
Fig. 1 Virtual water contents of main grains with the absolute satisfaction of crop water requirements in Beijing

3.2 虚拟水总量计算

结合不同作物虚拟水含量和历年作物产量,计算得到北京市 1980—2007 年 5 种主要粮食作物在生长需水得到完全满足条件下消耗的虚拟水总量,结果如表 1 所示。受农业种植结构调整等因素影响,北京市 5 种主要粮食作物生长消耗的虚拟水总量由 1980 年的 23.31 亿 m^3 下降为 2007 年的 9.28 亿 m^3 ;其中玉米和冬小麦生长消耗的虚拟水资源量所占比例较高,稻谷生长消耗的虚拟水资源量所占比例变化最为

明显,薯类和大豆生长消耗的虚拟水资源量所占比例较小且变化不明显。粮食作物生长消耗虚拟水资源量的变化直接反

映了近年来北京市农业产业结构调整的基本状况,即不断减少粮食作物种植面积、不断减少高耗水作物所占比例。

表 1 作物需水完全满足条件下北京市主要粮食作物生长消耗虚拟水总量 (10^8m^3)

Table 1 Virtual water amount consumed by main grains with the absolute satisfaction of crop water requirements in Beijing (10^8m^3)

年份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
冬小麦	9.60	10.62	10.35	10.82	10.32	9.48	10.12	9.21	10.46	10.16	8.47	9.16	10.30	10.03
稻谷	4.27	3.98	3.15	3.58	3.46	3.18	2.99	2.85	2.68	2.84	2.53	2.53	2.42	2.05
玉米	8.69	9.59	9.50	9.47	9.62	8.84	9.94	9.95	9.51	9.76	9.12	9.65	9.83	10.38
薯类	0.51	0.49	0.39	0.41	0.45	0.52	0.52	0.46	0.42	0.39	0.36	0.37	0.35	0.38
大豆	0.25	0.27	0.32	0.30	0.26	0.28	0.34	0.42	0.34	0.42	0.34	0.31	0.27	0.39
年份	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
冬小麦	9.46	10.08	10.12	9.27	8.45	8.70	7.00	4.03	2.68	1.79	2.29	3.05	3.38	2.29
稻谷	1.68	1.77	1.70	1.86	1.42	1.62	1.16	0.57	0.37	0.13	0.06	0.06	0.06	0.04
玉米	10.02	8.92	8.89	9.79	8.51	9.05	6.72	4.75	3.92	3.41	4.28	5.62	5.89	6.43
薯类	0.36	0.29	0.26	0.30	0.25	0.29	0.36	0.33	0.33	0.30	0.20	0.19	0.21	0.24
大豆	0.51	0.38	0.27	0.32	0.30	0.34	0.76	0.67	0.49	0.54	0.44	0.36	0.37	0.29

虽然近年来北京市主要粮食作物生长消耗的虚拟水总量不断减少,但与全市实体水资源量的对比(图 2)看,1999 年以来,伴随全市农业产业结构调整,粮食作物生长消耗的虚拟水资源量迅速减少,而气候暖干化导致实体水资源量显著减少;2007 年,北京市主要粮食作物在生长需水得到完全满足条件下消耗的虚拟水总量多于全市地表水资源量,占全市实体水资源总量的比例高达 38.98%,说明北京市通过农业产业结构调整进一步节约有限水资源的潜力巨大。

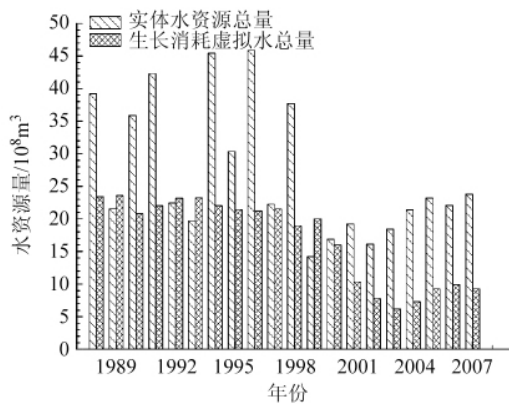


图 2 北京市实体水资源量与作物需水完全满足条件下主要粮食作物生长消耗虚拟水总量对比

Fig. 2 Comparison of real water and virtual water consumed by main grains with the absolute satisfaction of crop water requirements in Beijing

3.3 蓝水、绿水资源量计算

假设逐旬作物需水量得到不同满足程度的 4 种情况(100%、90%、75%和 50%),分别计算考虑土壤水储存和不考虑土壤水储存条件下北京市近 30 年主要粮食作物生长消耗

的蓝水资源量和绿水资源量(图 3、图 4)。

如图 3 所示,考虑土壤水储存条件下,假设逐旬作物需水得到 100%满足,则近 70%的年份主要粮食作物生长消耗的蓝水资源多于绿水资源,全市 2007 年的作物需水量(9.28亿 m^3)当中 66.92%由蓝水供给,绿水供给部分仅占 33.08%。而伴随着作物需水满足程度的不断降低,蓝水资源所占比例也逐渐减少,以 2007 年为例,由 100%满足条件下的 66.92%下降为 90%、75%和 50%满足条件下的 63.28%、55.89%和 34.05%。

与考虑土壤水储存条件下的变化相似,如图 4 所示,不考虑土壤水储存条件下伴随着作物需水满足程度的降低,蓝水资源占作物需水量的比例不断减少。以 2007 年为例,100%、95%、75%和 50%满足条件下分别为 67.78%、64.71%、59.05%和 50%。相同满足程度下,不考虑土壤水储存时作物生长消耗的蓝水资源量明显高于考虑土壤水储存时的蓝水消耗量,主要是因为前者计算过程中忽略了逐旬有效降水的剩余部分。

表 2 为作物需水完全满足条件下北京市 1988—2007 年主要粮食作物生长消耗蓝水资源量与全市实体水资源量的对比结果。可以看出,1988 年,考虑土壤水储存和不考虑土壤水储存两种情况下,主要粮食作物生长消耗的蓝水资源量分别占当年地表水资源量的 45.44%和 60.65%,而 2007 年相应比例已经上升至 81.71%和 82.76%;从粮食作物生长消耗蓝水资源量占农业用水的比例看,2007 年考虑土壤水储存和不考虑土壤水储存两种情况下分别为 49.92%和 50.56%。因此,在现行水资源评价结果基础上,北京市还有相当数量用于粮食作物生产的蓝水资源量可以通过农业产业结构调整而被用于其他社会经济部门。

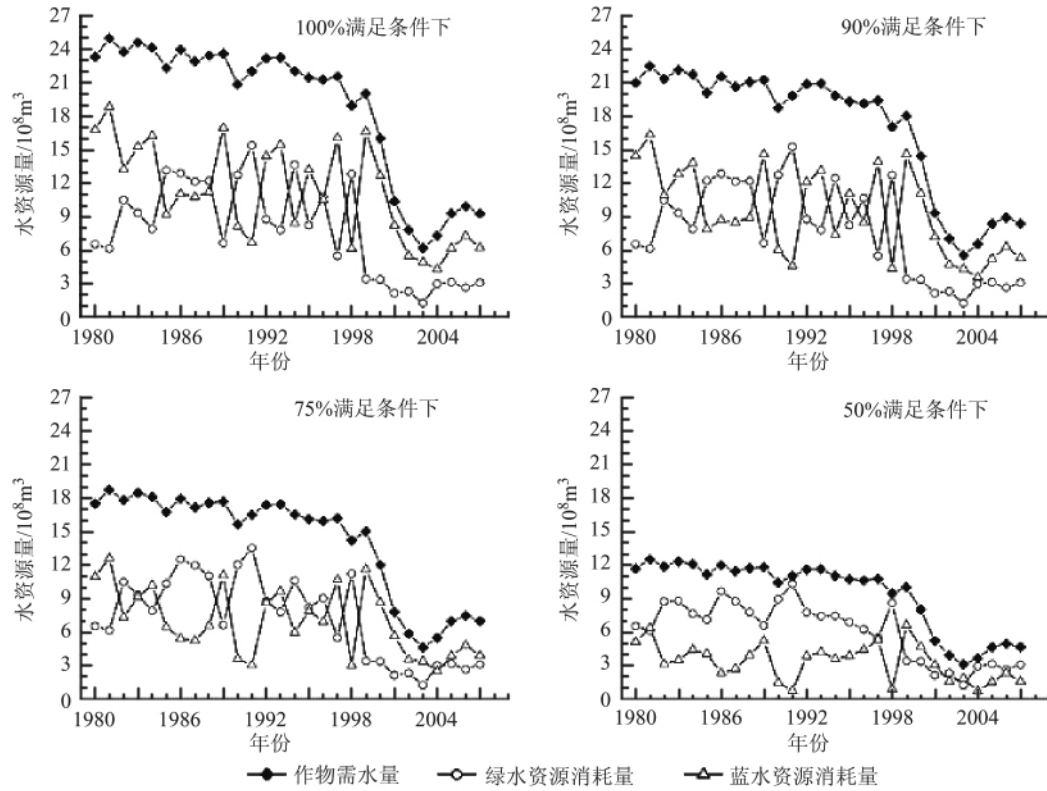


图 3 考虑土壤水储存条件下北京市主要粮食作物生长消耗绿水和蓝水资源量

Fig. 3 Green water and blue water consumed by main grains with the consideration of soil water storage in Beijing

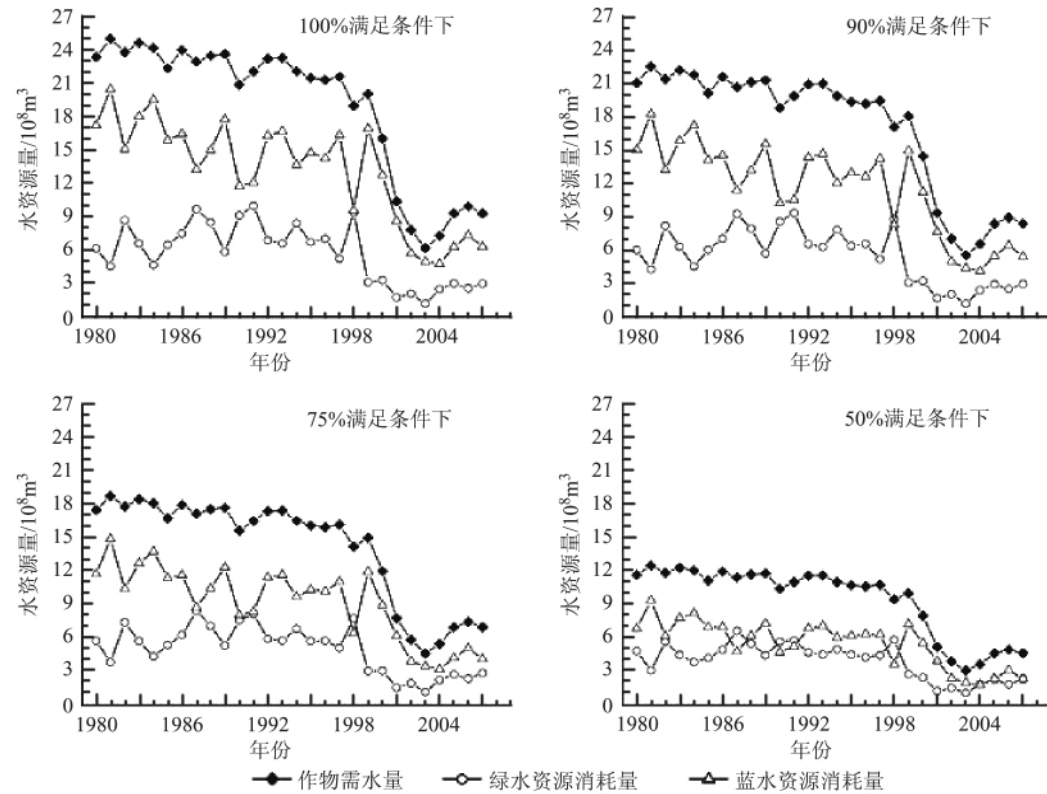


图 4 不考虑土壤水储存条件下北京市主要粮食作物生长消耗绿水和蓝水资源量

Fig. 4 Green water and blue water consumed by main grains without the consideration of soil water storage in Beijing

分别为 38.80 亿 m^3 、33.58 亿 m^3 、25.76 亿 m^3 和 12.72 亿 m^3 , 占当年全市实体水资源总量的比例分别为 175.80%、152.15%、116.72% 和 57.63%, 表明随着区域暖干化趋势的发展和在水资源短缺危机的加剧, 北京市已经通过粮食贸易节约了大量蓝水资源, 保证了区域社会经济和生态环境的可持续发展。

4.2 基于口粮贸易的虚拟水和蓝水输入

1998 年以前北京市生产的粮食作物均可满足全市人口的口粮消费需求, 因此本文主要研究 1999 年以来基于口粮贸易的虚拟水和蓝水输入量。假设考虑土壤水储存, 则作物需水不同满足条件下基于口粮贸易的虚拟水输入量和蓝水输入量计算结果如图 6 所示。1999—2003 年, 北京市基于口

粮贸易的虚拟水输入量和蓝水输入量持续增长, 作物需水不同满足条件下的增长比例均在 5 倍以上; 2004 年以来, 基于口粮贸易的虚拟水和蓝水输入量都维持在较高水平但波动幅度较小。从蓝水输入量占相应实体水资源的比例看, 作物需水不同满足条件下 (100%、90%、75% 和 50%) 的最高值均出现在 2003 年, 分别为 80.71%、69.73%、53.32% 和 25.92%, 而最低值则都出现在 1999 年; 同时, 在作物需水 100% 满足条件下, 2001—2007 年基于口粮贸易的蓝水输入量占当年实体水资源的比例均高于 50%, 说明近年来虚拟水战略在缓解北京市水短缺危机方面已发挥了重要作用。

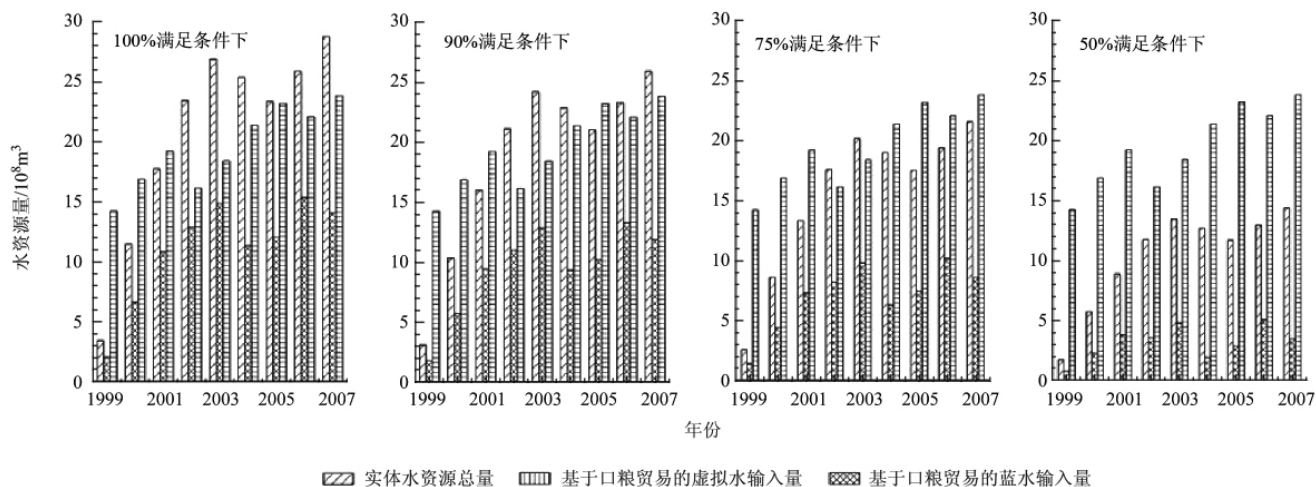


图 6 考虑土壤水储存条件下北京市基于口粮贸易的虚拟水和蓝水输入量

Fig. 6 Virtual water import and blue water import through food trade with the consideration of soil water storage in Beijing

5 结论

蓝水、绿水、虚拟水等概念的提出为在更广泛范围内找寻缓解区域水短缺危机的方法提供了新的途径。通过构建蓝水绿水细分模型并对北京市进行了实证研究。

1) 北京市近 30 年来主要粮食作物虚拟水含量的年际波动幅度较大, 在作物需水得到完全满足条件下, 主要粮食作物生长消耗的虚拟水总量由 1980 年的 23.31 亿 m^3 下降为 2007 年的 9.28 亿 m^3 。

2) 考虑土壤水储存和不考虑土壤水储存条件下, 伴随着作物需水满足程度的不断降低, 蓝水资源量占作物生长需水量的比例均逐渐减小, 但仍多在 50% 以上; 同时, 主要粮食作物生长消耗蓝水资源量占地表水资源量的比例不断上升, 2007 年达 80% 以上。

3) 1999 年以来, 北京市基于粮食贸易的虚拟水输入量和蓝水输入量迅速增加, 作物需水 100% 满足条件下基于粮食贸易的蓝水输入量最高达 38.80 亿 m^3 , 占相应实体水资源量的比例为 175.80%, 表明北京市已经通过粮食贸易节约了大量的蓝水资源。

4) 1999—2003 年, 北京市基于口粮贸易的虚拟水输入量和蓝水输入量持续增长; 2004 年以来, 基于粮食贸易的虚拟水和蓝水输入量都维持在较高水平但波动幅度较小。在作物需水 100% 满足条件下, 2001—2007 年基于口粮贸易的蓝水输入量占当年实体水资源的比例均高于 50%, 说明近年来虚拟水战略在缓解北京市水短缺危机方面发挥了重要作用。

对虚拟水战略中的蓝水和绿水进行细分研究, 突破了传统水资源评价和管理的范畴, 为运用系统思维从多个角度寻求解决区域水资源问题的方法和维护区域粮食安全的途径提供了更为科学的借鉴和参考, 具有重要的理论意义和实践价值。由于缺乏研究区粮食作物的贸易数据, 对于虚拟水输入量和蓝水输入量的估算可能存在一定偏差, 对于作物生长需水量的计算也缺乏实际观测数据的验证, 这都需在今后的研究中进行完善。

参考文献 (References)

- [1] Shiklomanov I A. Appraisal and assessment of world water resources[J]. *Water International*, 2000, 25(1): 11–32.

- [2] Falkenmark M. Land-water linkages: A synopsis [C]//Land and Water Integration and River Basin Management: Proceedings of an FAO informal workshop. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1995(1): 15-16.
- [3] Ringersma J, Batjes N H, Dent D L. Green water: Definitions and data for assessment[R]. Wageningen: ISRIC-World Soil Information, 2003.
- [4] 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.
- [5] Alexandratos N, Wiley J, Chicheste S. World agriculture: Towards 2010 [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1995.
- [6] Graham J. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31(15-16): 753-762.
- [7] Monireh F, Karim C A, Rainer S, et al. Modelling blue and green water resources availability in Iran [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(3): 486-501.
- [8] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 221-227.
Cheng Guodong, Zhao Wenzhi. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(3): 221-227.
- [9] 刘昌明, 李云成. “绿水”与节水: 中国水资源内涵问题讨论[J]. *科学对社会的影响*, 2006(1): 16-20.
Liu Changming, Li Yuncheng. *Impact of Science on Society*, 2006(1): 16-20.
- [10] 李小雁. 流域绿水研究的关键科学问题 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 707-712.
Li Xiaoyan. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 707-712.
- [11] 邱国玉. 陆地生态系统中的绿水资源及其评价方法 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 713-722.
Qiu Guoyu. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 713-722.
- [12] 吴洪涛, 武春友, 郝芳华, 等. 绿水的多角度评估及其在碧流河上游地区的应用[J]. *资源科学*, 2009, 31(3): 420-428.
Wu Hongtao, Wu Chunyou, Hao Fanghua, et al. *Resources Science*, 2009, 31(3): 420-428.
- [13] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro political future would be impossible[C]//ODA, Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA, 1993: 13-26.
- [14] Allan J A, Karshenas M. Managing environmental capital: The case of water in Isreal, Jordan, the west bank and gaza, 1947 to 1995[C]//Allan J A, Court J H. Water, Peace and the Middle East: Negotiating Resources in the Jordan Basin. London: I. B. Taurus Publishers, 1996.
- [15] Hoekstra A Y. Virtual water trade: An introduction [C]. Hoekstra A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12. IHE Delft, 2003: 13-23.
- [16] Hoekstra A Y. Virtual water trade between nations: A global mechanism affecting regional water systems [J]. *IGBP Global Change News Letter*, 2003, 54: 2-4.
- [17] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade [J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 45-56.
- [18] Dabrowski J M, Murray K, Ashton P J, et al. Agricultural impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(4): 1074-1082.
- [19] 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, 18(4): 260-265.
Cheng Guodong. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2003, 18(4): 260-265.
- [20] 马静, 汪党献, Hoekstra, 等. 虚拟水贸易在我国粮食安全问题中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(1): 102-107.
Ma Jing, Wang Dangxian, Hoekstra, et al. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 102-107.
- [21] 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.
Xu Zhongmin, Long Aihua, Zhang Zhiqiang. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 861-869.
- [22] 尚海洋, 陈克恭, 徐中民. 甘肃省 1992—2005 年城镇不同收入群体的虚拟水消费特征[J]. *资源科学*, 2009, 31(3): 406-412.
Shang Haiyang, Chen Kegong, Xu Zhongmin. *Resources Science*, 2009, 31(3): 406-412.
- [23] Ohlsson L. The turning of a screw: Social resource scarcity as a bottleneck in adaptation to water scarcity[J]. *Stockholm Water Front*, 2000(1): 10-11.
- [24] Allan J A. Virtual water: A long term solution for water short Middle Eastern economics? [R]. 1997 British Association Festival of Science, Water and Development Session. University of Leeds, 1997.
- [25] Novo P, Garrido A, Varela-Ortega C. Are virtual water "flows" in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity? [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(5): 1454-1464.
- [26] 王红瑞, 王岩, 王军红, 等. 北京农业虚拟水结构变化及贸易研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2877-2884.
Wang Hongrui, Wang Yan, Wang Junhong, et al. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2877-2884.
- [27] 国家农业科学数据共享中心[EB/OL]. <http://www.agridata.cn/>.
National Agricultural Science Data Sharing Platform [EB/OL]. <http://www.agridata.cn/>.
- [28] Dastane N G. Effective rainfall in irrigated agriculture[R]. Irrigation and Drainage Paper No. 25, Rome: Food and Agriculture Organization, 1974.
- [29] Brouwer C, Heibloem M. Irrigation water management: Irrigation water needs [R]. Irrigation Water Management Training Manual No. 3, Rome: Food and Agriculture Organization, 1986.
- [30] 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫, 等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(3): 27-30.
Liu Zhandong, Duan Aiwang, Xiao Junfu, et al. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(3): 27-30.
- [31] 李磊, 吴晓华. 黑龙江省农产品虚拟水状况分析及对策研究 [J]. *科学·经济·社会*, 2008, 26(4): 41-45.
Li Lei, Wu Xiaohua. *Science Ecology Society*, 2008, 26(4): 41-45.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“科技纵横捭阖”栏目征稿

“科技纵横捭阖”栏目由上海交通大学人文学院关增建教授主持,为评论体文章。欢迎读者就国内外重大科技事件、科技人物、科技话题进行评论,发表自己独立的见解和观点。每篇文章约 2200 字,要求行文深入浅出、言简意赅、逻辑清晰、有理有据、观点鲜明、切中要害,可读性强,并附必要的参考文献(不多于 3 条)。栏目责任编辑:王芷;投稿邮箱:wangzhi@cast.org.cn。