

北京市农作物虚拟水含量分布

王红瑞¹, 董艳艳¹, 王军红¹, 王岩², 韩兆兴³

(1. 北京师范大学水科学研究院水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要:采用灌溉定额法对北京市各区县粮食虚拟水含量和蔬菜虚拟水含量历年的分布进行了计算和分析, 并将其与北京市地下水资源分布和开采状况进行了现状对比. 结果表明: ①各区县粮食虚拟水含量总体上均呈下降趋势, 但延庆县的粮食生产会给当地地下水资源带来较大的压力; ②顺义区、大兴区、平谷区蔬菜历年的虚拟水含量总体呈增长趋势, 在全市蔬菜虚拟水总量中所占的比例依次逐渐增大, 而海淀区、丰台区、朝阳区蔬菜历年的虚拟水含量在全市所占的比例呈逐渐减小趋势; ③北京地区历年的粮食虚拟水含量总和整体呈现下降趋势, 蔬菜虚拟水含量总和略呈增长趋势, 但是二者虚拟水含量的总和呈现下降趋势, 这与北京市近年来的农业种植结构调整政策是相符合的.

关键词: 粮食虚拟水; 蔬菜虚拟水; 地下水; 北京市

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2432-06

Distribution of Virtual Water of Crops in Beijing

WANG Hong-rui¹, DONG Yan-yan¹, WANG Jun-hong¹, WANG Yan², HAN Zhao-xing³

(1. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Virtual water content of grains and vegetables in Beijing's districts is calculated and analyzed for many years by irrigating water quota method, which is compared with the distribution and exploitation of groundwater in Beijing. The results indicate the virtual water content of grains shows a downward trend in all the districts, but the grain production in Yanqing district brings great pressure to the local groundwater. Secondly, the virtual water content of vegetables shows an upward trend in Shunyi District, Daxing district and Pinggu District and is accounting for more and more gradually. Thirdly, the total virtual water volume of grains is decreasing, and the total virtual water volume of vegetables is increasing and the total virtual water volume of crops in Beijing is reducing in recent years, which corresponds with the structural adjustment of policies.

Key words: virtual water of crops; virtual water of vegetables; groundwater; Beijing

水资源短缺是我国实施可持续发展战略长期面临的重要制约因素, 而关于虚拟水问题的研究则可促进地区水资源的有效利用、管理观念和制度的创新^[1]. 虚拟水理论及应用的研究涉及工农业生产、水利、国际贸易、区域经济以及国家宏观政策、产业调整等诸多领域. 虽然我国有关虚拟水的研究尚处于起步阶段, 但是已得到了理论界的广泛关注, 成为探讨水资源可持续利用的热点问题^[2].

虚拟水概念是 Allan 教授于 1993 年提出^[3,4], 是指生产农产品所需要的水^[5,6], 包括作物生长过程中所需的灌溉水和土壤水^[7]. 虚拟水问题越来越受到全世界水资源管理决策者的关注, 尤其在与水密集型产品的生产方面, 全世界开展了大量的研究. 2002-12 第一次关于虚拟水的国际会议在荷兰代尔夫特举行, 紧接着 2003-03 在日本召开的第三届世界水论坛上又对虚拟水贸易进行了专题讨论^[8], 这 2 次会议极大的推动了虚拟水在全球范围内研究工

作的展开^[9]. 国外虚拟水的研究可归纳为 2 个方面. 一是虚拟水理论与粮食安全^[10~12], 二是虚拟水战略与水生态足迹^[13,14].

在国内, 程国栋院士^[15]首先应用“虚拟水”, 并以西北干旱区为例, 初步计算了 2000 年西北各省(区)虚拟水消费量. 此后, 有一些学者对虚拟水的理论和实际意义作了一定的研究^[16~18]. 部分研究者将虚拟水的理论和计算方法应用到地区的实践中^[19~21].

1 农产品虚拟水研究的基本意义

虚拟水是一个全新的概念, 结合了农业科学和经济学两方面的思想. 农业科学关注的是生产各种农产品需要的水资源数量, 而经济学则关注的是水

收稿日期: 2006-11-23; 修订日期: 2007-03-31

基金项目: 国家科技支撑计划专题项目(2006BAD20B06)

作者简介: 王红瑞(1963~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水文水资源、环境规划与评价, E-mail: henryzsr@bnu.edu.cn

资源在各种产品(包括工业品)生产过程中的机会成本.两方面含义的结合则意味着虚拟水概念在寻求水资源合理配置方面所具有的重大意义.由于不同国家和地区的资源禀赋不同,粮食输入和用水的直接成本和机会成本也不相同.尤其农业是受自然条件制约最显著的产业,其生产水平受自然生态系统和人类社会经济系统的双重制约,除了水资源外,土壤、气候等自然地理条件,区域产业结构、经济管理体制等人文社会因素从更广泛的意义上影响着粮食生产用水的机会成本^[22].目前,虚拟水概念已经从上述农产品扩展到服务、加工以及材料,也可以理解为服务过程中或材料形成过程中所消耗的水资源.

北京市人均水资源量不足 300 m³,为全国的 1/8,世界的 1/30,远远低于国际公认的人均1 000 m³的下限,在世界 120 多个大城市中位居百位之后,属重度缺水地区,而北京市农业用水约占北京全部用水的 50%左右^[23].但是北京地区经济发展速度全国领先,而经济发展无一例外地以用水量的增加为代价.据规划,到 2010 年,北京将建成为世界一流的现代化国际大都市,届时北京的用水量势必大增;而在现有供水能力条件下,缺口很大.同时北京地区的资源流动强度很高,所以开展北京地区农作物虚拟水研究应该是很有意义的,这将为北京地区优化农业用水结构、开辟解决水资源危机提供新的途径.

2 北京各区县农作物虚拟水含量的分析与计算

北京位于华北平原西部,全市总面积16 807.8 km²,其中山区面积10 417.5 km²,占 62%,平原面积 6 390.3 km²,占 38%.北京地区的地势西北高、东南低,呈阶梯状下落.西部和北部群山环绕,地形陡峻,东南部是一片缓缓向渤海倾斜的平原.境内平均海拔 43.71 m.全市划分为 16 区、2 县:其中东城区、西城区、崇文区、宣武区、朝阳区、丰台区、石景山区、海淀区为城区;门头沟区、房山区、通州区、顺义区、昌平区、大兴区、平谷区、怀柔区属于近郊区;密云县、延庆县为远郊县(见图 1).

2.1 各区县农作物虚拟水含量计算与分析

北京一直有种植水稻的传统,但面积不大,最多曾超过 2×10⁴ hm²,主要集中在海淀和通州一带,种植面积由 1990 年的34 248.0 hm²锐减到 2003 年的 1 615.3 hm².另外,根据北京农业结构调整政策,要将耗水量大的水稻于 2008 年前淡出北京农业.因此,各地区的粮食作物可看作主要由冬小麦和夏玉米构成.又由于二者生育期需水量基本相同,所以,

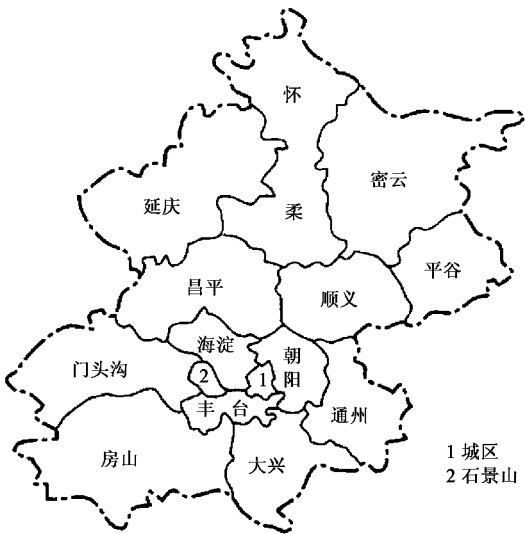


图 1 北京行政区划

Fig.1 Administrative divisions schematic of Beijing

取二者的均值作为粮食作物的需水量,依据农产品虚拟水含量的计算公式,计算得北京各区县的粮食虚拟水含量见表 1.

由表 1 可知,各区县粮食虚拟水含量总体上均呈下降趋势,但延庆县粮食虚拟水含量在全市所占的比例越来越大,主要原因是其粮食种植面积的减少幅度相对其他区县较小;而丰台区、朝阳区、顺义区粮食虚拟水含量在全市所占的比例逐渐减小,这是由于其粮食产量减少较大的缘故;其他区县粮食虚拟水含量在全市所占的比例变化不大.

同理,各区县蔬菜虚拟水含量计算结果见表 2.由表 2 可以看出各区县蔬菜虚拟水含量历年的结构变化,顺义区、大兴区,平谷县蔬菜历年的虚拟水含量总体呈增长趋势,在全市蔬菜虚拟水总量中所占的比例依次逐渐增大,其主要原因是其蔬菜种植面积的减少幅度较其它区县小,通州区近年来蔬菜虚拟水含量增长较快,并且和大兴区、顺义区一样是北京的主要蔬菜供应基地;特别是大兴区和通州区随着农业结构调整从粮食生产基地逐渐转变成蔬菜生产基地,其粮食虚拟水含量不断下降,而蔬菜虚拟水含量则不断上升.而海淀区、丰台区、朝阳区随着城市用地的扩张、蔬菜用地的减少,其历年的蔬菜虚拟水含量在全市所占的比例呈逐渐减小趋势;其他区县蔬菜虚拟水含量在全市所占的比例变化不大.

2.2 各区县农作物虚拟水含量现状分布

以 2003 年为例(见图 2),各区县单位粮食虚拟水含量差异较大,其中门头沟区最大,每 t 粮食虚拟

水含量大于 $4\,268\text{ m}^3$;其次是密云县和丰台区,每 t 量最小的是顺义区、通州区和大兴区,每 t 粮食虚拟粮食虚拟水含量均大于 $1\,122\text{ m}^3$;单位粮食虚拟水含量均在 $1\sim 561\text{ m}^3$ 之间。

表 1 北京各区县粮食虚拟水含量 $\times 10^4/\text{m}^3$

Table 1 Virtual water content of grains in all the districts of Beijing $\times 10^4/\text{m}^3$										
地点	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
朝阳区	3 289.39	3 096.35	3 007.32	2 918.02	2 717.08	2 611.40	1 705.82	925.00	464.13	211.32
丰台区	1 045.80	970.22	958.36	938.60	871.42	832.62	739.06	649.69	512.77	179.17
海淀区	2 094.75	2 032.73	2 038.32	1 312.52	1 944.19	1 914.36	1 667.71	817.46	624.72	296.82
门头沟区	1 562.67	1 597.37	1 421.58	1 366.86	1 382.55	943.43	910.52	778.01	652.04	455.43
房山区	12 688.88	12 392.37	12 386.10	12 236.00	12 174.59	12 005.38	10 137.30	6 500.36	5 742.71	5 311.79
通州区	15 428.65	15 416.37	15 281.32	15 017.98	15 034.40	14 103.85	9 604.54	6 974.29	6 227.14	5 462.69
顺义区	16 081.56	15 226.79	15 290.06	15 251.68	7 546.76	7 139.97	6 099.53	7 023.08	6 158.28	4 961.39
昌平区	8 461.42	8 145.26	7 861.06	7 713.24	15 317.50	15 245.56	10 322.74	4 367.72	3 208.57	2 487.18
大兴区	12 640.13	12 162.85	11 942.64	11 940.74	11 964.30	11 385.90	9 706.30	7 298.58	5 986.33	5 155.00
平谷区	6 546.79	6 390.88	6 035.16	5 931.04	5 422.90	5 191.41	39 907.60	2 915.51	2 477.49	2 037.75
怀柔区	5 289.49	5 098.16	5 068.44	4 924.42	4 908.54	4 736.17	3 925.13	2 620.71	2 115.65	2 059.49
密云县	6 709.62	6 422.27	6 334.60	6 209.96	6 178.35	6 108.65	5 652.77	3 458.53	1 969.65	1 807.93
延庆县	9 729.10	9 500.95	9 171.30	8 159.74	9 981.65	8 908.91	8 128.54	7 831.42	7 329.02	6 908.63

表 2 北京各区县蔬菜虚拟水含量 $\times 10^4/\text{m}^3$

Table 2 Virtual water content of vegetables in all the districts of Beijing $\times 10^4/\text{m}^3$										
地点	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
朝阳区	3 020.64	2 846.13	2 406.08	2 411.85	2 430.75	2 319.45	2 645.27	2 522.21	2 566.52	2 091.81
丰台区	3 394.76	2 925.93	2 772.11	2 471.91	2 286.90	2 081.84	1 678.43	1 816.71	1 465.28	1 051.58
石景山区	349.97	318.15	139.97	133.04	133.04	118.97	113.46	108.57	108.47	101.24
海淀区	2 396.52	2 388.44	1 983.87	2 015.90	1 946.70	452.24	1 045.07	562.28	642.08	463.16
门头沟区	539.91	558.08	478.28	474.50	458.75	2 218.76	370.97	395.12	411.39	380.84
房山区	1 926.75	2 322.71	2 255.30	2 326.49	2 458.58	7 102.31	2 477.06	2 790.48	2 791.32	2 740.29
通州区	7 101.36	6 496.46	6 319.74	6 424.85	6 424.85	1 632.23	9 390.05	9 561.62	12 641.06	10 480.58
顺义区	6 092.52	7 819.77	7 777.04	7 716.03	1 519.88	7 423.40	1 805.37	10 397.10	10 414.85	10 249.37
昌平区	1 675.80	1 803.38	1 550.85	1 853.57	7 522.20	10 253.57	9 569.07	1 766.42	1 516.10	1 582.04
大兴区	9 699.69	10 183.74	9 403.70	9 631.97	9 720.69	3 106.74	12 207.30	13 852.34	13 644.33	13 353.38
平谷区	2 445.56	2 934.75	2 750.48	2 877.32	2 947.35	820.89	3 835.44	4 299.75	4 448.01	4 332.93
怀柔区	993.20	1 254.02	1 267.88	1 161.83	915.18	1 386.95	1 008.21	908.15	695.73	744.56
密云县	1 313.97	1 621.41	1 534.58	1 529.64	1 418.03	4 861.61	1 491.53	1 491.74	1 769.57	1 670.03
延庆县	3 417.86	3 563.60	3 427.73	3 563.60	4 629.24	4 925.01	5 842.20	5 821.73	6 142.29	5 371.91

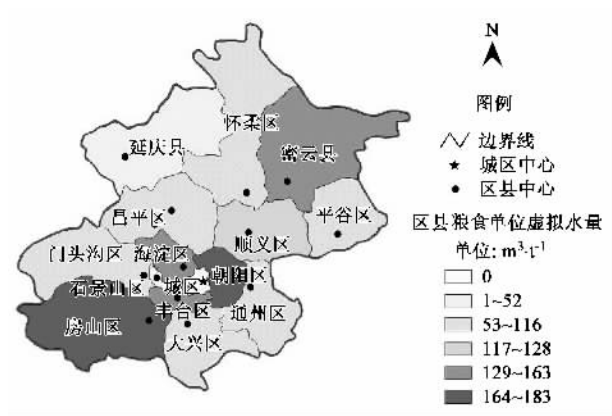


图 2 2003 年北京各区县单位粮食虚拟水含量分布 (石景山区和城区未统计)

Fig.2 Distribution of virtual water content per capita of grains in the districts of Beijing in 2003

但是北京各区县粮食虚拟水含量的分布与其单位粮食虚拟水含量的分布不尽一致,因为北京各区县的农业发展重点不尽相同,粮食种植结构和产量也不相同.仍以 2003 年为例,其中延庆县粮食虚拟水含量最大,其粮食虚拟水含量大于 $5\,464 \times 10^4\text{ m}^3$;其次为顺义区、通州区、大兴区和房山区,其粮食虚拟水含量亦高于 $2\,488 \times 10^4\text{ m}^3$;门头沟区、海淀区、朝阳区和丰台区粮食虚拟水含量在全市最少,在 $1\sim 455 \times 10^4\text{ m}^3$ 之间(见图 3).

2003 年北京市各区县蔬菜单位虚拟水含量差异也很明显,房山区和朝阳区蔬菜单位虚拟水含量最高,每 t 蔬菜其虚拟水含量大于 164 m^3 ;其次是密云县、海淀区和丰台区,蔬菜单位虚拟水含量均大于 129 m^3 ;延庆县蔬菜单位虚拟水含量在全市最小,每

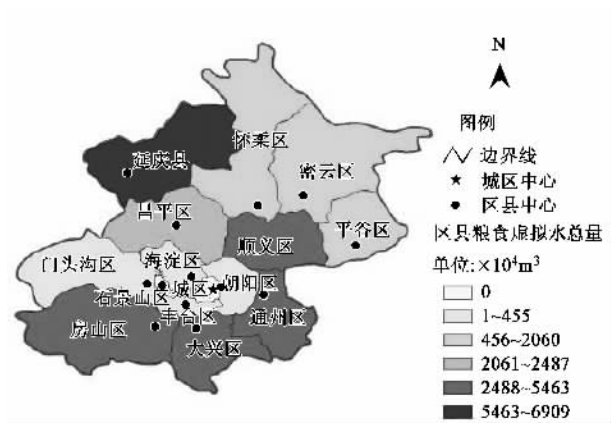


图3 2003年北京各区县粮食虚拟水含量分布(石景山区和城区未统计)

Fig.3 Distribution of virtual water content of grains in the districts of Beijing in 2003

t 大约为 46 m³ 左右(见图 4)。

由图 5 可知,2003 年各区县蔬菜虚拟水含量较高的依次为大兴区、通州区和顺义区,其蔬菜虚拟水含量均大于 10 240 × 10⁴ m³;其次较大的是延庆县、平谷区、房山区和丰台区,其蔬菜虚拟水含量介于 1 050 × 10⁴ ~ 5 500 × 10⁴ m³ 之间;而石景山区、海淀区、门头沟区和怀柔区蔬菜虚拟水含量最少,均介于 100 × 10⁴ ~ 750 × 10⁴ m³ 之间。

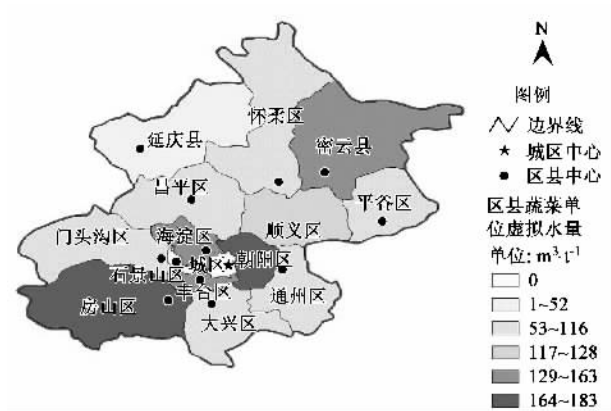


图4 2003年北京各区县蔬菜单位虚拟水含量分布
Fig.4 Distribution of virtual water content per capita of vegetables in the districts of Beijing in 2003

3 各区县农产品虚拟水含量与水资源对比分析

北京市农业的发展多年来长期靠超采地下水来维持,且农业用水总量中 85% ~ 90% 靠消耗地下水^[24],因此,对各区县的粮食和蔬菜虚拟水含量分别与当地地下水资源作比较是很有意义的。

北京各区县地下水多年平均可采量最大的是顺

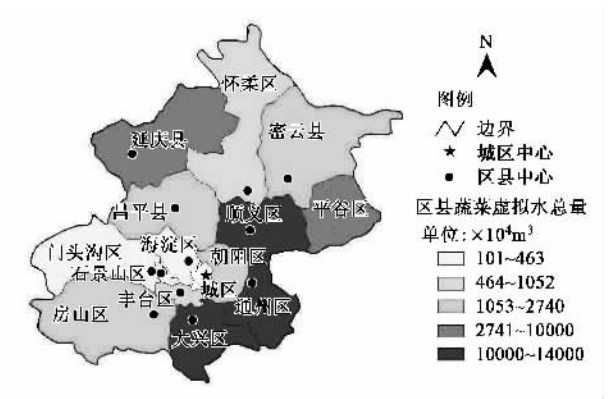


图5 2003年北京各区县蔬菜虚拟水总量分布

Fig.5 Distribution of virtual water content of vegetables in the districts of Beijing in 2003

义区,为 43 000 × 10⁴ m³/a,其次是房山区和大兴区,分别为 31 100 × 10⁴ m³/a 和 28 000 × 10⁴ m³/a;可采量最少的是门头沟区,为 2 000 × 10⁴ m³/a(见图 6)。

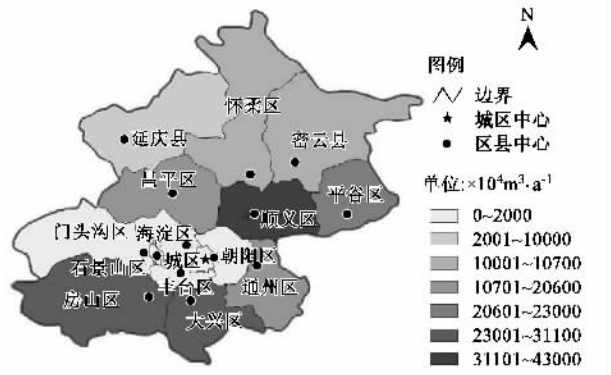


图6 北京各区县地下水多年平均可采量
(城区和近郊区由于地下水资源量较少,未作统计)

Fig.6 Exploitable amount of groundwater in all the districts of Beijing for many years

朝阳、海淀、丰台、石景山(环城乡结合部)处于地下大漏斗之上,地面沉降突出,地表水污染较重,地下水总硬度、硝酸盐污染加剧,但农作物种植面积也逐年减少,4 个区县蔬菜虚拟水总含量只占全市蔬菜虚拟水总量的 6.40%,而其粮食虚拟水总含量只占全市粮食虚拟水总量的 1.84%。因此,城乡结合部水资源的压力主要是生活用水和工业用水,农业生产对地下水的影响不大。

由图 3 和图 6 可知,粮食虚拟水含量的分布与北京各区县地下水多年平均可采量分布大致吻合。即在可采量较大的区县,如顺义区、房山区和大兴区,其对应的粮食虚拟水含量在全市也较大;地下水可采量最少的门头沟区对应的粮食虚拟水含量也很小。但是,延庆县地下水可采量仅高于门头沟区,为

9 000 × 10⁴ m³/a,但其粮食虚拟水含量在全市却位居第一,因此,延庆县的粮食生产会给当地水资源带来一定的压力.

由图 5 和图 6 可知,蔬菜虚拟水含量较大的为大兴区、顺义区和通州区,其中大兴区和顺义区所对应的地下水多年平均可采量相对也较大,房山区地下水可采量较大,仅次于顺义区,但其蔬菜虚拟水含量相对比较小,因此,该区可以适当发展蔬菜种植业;门头沟区、怀柔区地下水资源可采量较小,其所对应的蔬菜虚拟水含量也较少.

通州和门头沟两区为地下水超采区,特别是通州城关地区地下水严重开采(见表 3)^[25].通州区粮食和蔬菜的虚拟水含量在全市均较高,加之其地处“九河下梢”,几乎接纳了北京地区的全部污水,导

致通州区地表径流虽然数量很多,但水质极差,已失去作为清洁水源的水体功能,无法加以有效利用,所以通州区水资源压力较大.门头沟的山区面积较大,虽然平原区已经严重超采,但山区地下水资源尚有一定的开发潜力.因此,粮食和蔬菜的种植对当地水资源的压力相对较小.房山区有 2/3 的面积为山区,富水性差别很大,平原中部大石河两岸污染严重,且为超采区;顺义区位于潮白河冲洪积扇上部,虽然水资源较丰富但仍为超采区.房山区和顺义区的粮食和蔬菜虚拟水含量较大,其耗水量会对当地水资源产生较明显的影响.地下水开采程度较小的是平谷、延庆、昌平和密云等各区县,其中地下水开采潜力最大的是平谷区,以 2003 年为例,其蔬菜虚拟水总量和粮食虚拟水含量相对较小,可适当分担其他区县

表 3 北京各区县地下水开采程度
Table 3 Exploitation degree of groundwater in all the districts of Beijing

区县	山区		平原区		平原区开采程度/%
	可开采量 × 10 ⁴ /m ³ ·a ⁻¹	实际开采量 × 10 ⁴ /m ³ ·a ⁻¹	可开采量 × 10 ⁴ /m ³ ·a ⁻¹	实际开采量 × 10 ⁴ /m ³ ·a ⁻¹	
门头沟区	1 500	1 131.60	500	628.07	125.6
房山区	3 100	3 625.50	28 000	28 922.50	103.3
通州区	0	0	22 000	22 841.07	103.8
顺义区	0	0	43 000	50 855.18	118.3
昌平区	1 600	1 222.02	19 000	16 984.07	89.4
大兴区	0	0	26 000	24 922.41	95.9
平谷区	3 000	1 328.51	20 000	14 674.22	73.4
怀柔区	2 400	2 524.51	8 000	7 675.96	95.9
密云县	3 700	3 615.02	7 000	6 288.15	89.8
延庆县	1 000	201.29	8 000	6 264.9	78.3
总计	16 300	13 648.45	181 500	180 056.53	99.2

的粮食的种植比例,平衡全市农业水资源用量.

由图 7 可知,北京地区历年的粮食虚拟水含量总和整体呈现下降趋势,蔬菜虚拟水含量总和略呈增长趋势,但是两者虚拟水含量的总和呈现下降趋势,这与北京市近年来的农业种植结构调整政策是

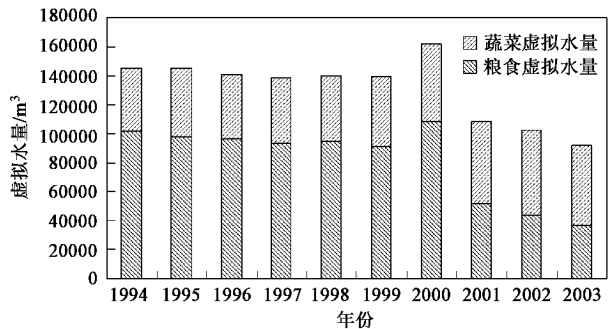


图 7 北京地区历年的粮食虚拟水含量和蔬菜虚拟水含量

Fig.7 Virtual water content of grains and vegetables in Beijing for many years

相符合的.

4 结论

(1)各区县粮食虚拟水含量总体上均呈下降趋势,但延庆县粮食虚拟水含量在全市所占的比例越来越大,而地下水可采量相对较少,所以延庆县的粮食生产会给当地地下水资源带来较大的压力.

(2)顺义区、大兴区,平谷县蔬菜历年的虚拟水含量总体呈增长趋势,在全市蔬菜虚拟水总量中所占的比例依次逐渐增大,而海淀区、丰台区、朝阳区蔬菜历年的虚拟水含量随着城市用地的扩张、蔬菜用地的减少,其在全市所占的比例呈逐渐减小趋势;其他区县蔬菜虚拟水含量在全市所占的比例变化不大.

(3)北京地区历年的粮食虚拟水含量总和整体呈现下降趋势,蔬菜虚拟水含量总和略呈增长趋势,但是二者虚拟水含量的总和呈现下降趋势,这与北京市近年来的农业种植结构调整政策是相符合的.

参考文献:

[1] 王红瑞,董艳艳,王军红,等. 关于虚拟水与虚拟水贸易的讨论[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2006,42(6): 647 ~ 652.

[2] Wang H, Liu X, Dong Y, *et al.* Analysis of China's Water Security and Virtual Water Trade. Chinese [J]. Journal of Population, Resources and Environment,2006,4(4):18 ~ 23.

[3] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [A]. In: Priorities for water resources allocation and management [C]. London: ODA, 1993. 13 ~ 26.

[4] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions [A]. In: Rogers P, Lydon P. Water in the Arab World: perspectives and prognoses [C]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1994. 65 ~ 100.

[5] Allan J A. Global soil water: A long term solution for water-short Middle Eastern Economies [A]. In: Proceeding of water workshop: Averting a water crisis in the Middle East-make water a medium of cooperation rather than conflict [C]. Mar Geneva: Green Cross International, 1998. 10 ~ 22.

[6] Hoekstra A Y. Perspectives on Water: An integrated model-based exploration of the future [A]. In: International Books [C]. Utrecht: the Netherlands, 1998. 20 ~ 32.

[7] Merrett S, Allan J A, Lant C. Virtual Water the Water, Food, and Trade Nexus Useful Concept or Misleading Metaphor? [J]. Water International, 2003,28(1):4 ~ 11.

[8] Hokstra A Y. Virtual water trade: an introduction [A]. In: Value of Water Research Report Series [C]. Delft: IHE, 2003. 13 ~ 23.

[9] Merrett S. Virtual Water and the Kyoto Consensus A Water Forum Contribution [J]. Water International, 2003,28(4):540 ~ 542.

[10] Wichelns D. The policy relevance of virtual water can be enhanced by considering comparative advantages [J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(1): 49 ~ 63.

[11] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenij H H G, *et al.* Analysis the water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries [J]. Ecological Economies, 2006, 60 (3): 186 ~ 203.

[12] Dabo G, Klaus H. Assessment of regional trade and virtual water flows in China [J]. Ecological Economies, 2006, 60(1): 1 ~ 12.

[13] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leave out [J]. Environment Urban, 1992, 4 (2): 120 ~ 130.

[14] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. Ecological Economies, 1999, 53(4): 375 ~ 390.

[15] 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, 20(3): 260 ~ 263.

[16] 柯兵, 柳文华, 段光明, 等. 虚拟水在解决农业生产与粮食安全 问题中的作用研究 [J]. 环境科学, 2004, 25(2): 32 ~ 36.

[17] 曹建廷, 李原园, 张文胜, 等. 农畜产品虚拟水研究的背景、方法 及意义 [J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 829 ~ 834.

[18] 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, 16(13): 37 ~ 39.

[19] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000 年的水资源足 迹 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 692 ~ 699.

[20] 黄晓荣, 裴源生, 梁川. 宁夏虚拟水贸易计算的投入产出方 法 [J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 564 ~ 568.

[21] 王红瑞, 王军红. 中国畜产品的虚拟水含量 [J]. 环境科学, 2006, 27(4): 609 ~ 615.

[22] Kumar M D, Singh O P. Virtual Water in Global Food and Water Policy making: Is There a Need for Rethinking? [J]. Water Resources Management, 2005, 46(19): 759 ~ 789.

[23] Wang Y, Wang H. Sustainable use of water resources in agriculture in Beijing: problems and countermeasures [J]. Water Policy, 2005, 7(4): 345 ~ 357.

[24] 刘冀宏, 沈秀英. 北京市缓解农业用水紧缺的途径 [J]. 北京水利, 2004, 46(6): 29 ~ 30.

[25] 北京市用水调研课题组. 北京市用水调研报告 [R]. 北京: 北京市水务局, 2002. 10 ~ 15.