



基于 CROPWAT 模型的哈尔滨地区 26 年大豆生产水足迹变化研究

徐 猛¹, 金 梁², 魏 丹³, 殷大伟⁴, 李玉梅², 王 伟², 张久明², 胡军祥⁵

(1. 沈空后勤部克东农副业基地, 黑龙江 克山 161600; 2. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所/黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 北京市农林科学院 植物营养与资源研究所, 北京 100097; 4. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 5. 空军农业新技术试验培训基地, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 水足迹是大豆主产区作物生长期农业用水评价的新指标体系, 为定量评价哈尔滨地区大豆生产水足迹组成及降雨年型对大豆生产的影响, 利用 CROPWAT 模型计算哈尔滨 1986–2011 年 26 年间大豆生产水足迹, 探讨不同降水年型大豆生产水足迹及其水足迹组成来源的变化规律, 评价其与哈尔滨地区大豆种植面积和产量的关系。结果表明: 26 年间, 大豆生产水足迹中, 蓝水足迹和绿水足迹所占的比例不同, 绿水足迹为 $0.12 \sim 0.29 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 是大豆水足迹的主要组成部分; 对比不同降水年型大豆生产水足迹组成, 在欠水年型整体上存在着显著的蓝水集聚效应, 出现蓝水的 5 个年份主要集中在欠水年区域, 蓝水范围为 $0.0174 \sim 0.0482 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 占水足迹 $9.52\% \sim 28.73\%$; 1986–2011 年水足迹整体呈递减趋势, 即随着农业管理技术的提升, 单位产量绿水消耗量在逐渐减少。丰水年和欠水年与平水年相比, 有效降雨量与大豆单产拟合方程 R^2 较大, 表明在雨量较大或较小时降水分布对产量影响效应关系更接近于二次函数。本研究结果能够为黑龙江大豆主产区水肥统筹管理提供依据。

关键词: 大豆; 水足迹; CROPWAT 模型; 降雨年型

Research on Soybean Production Water Footprint Based on CROPWAT Model During Past 26 Years in Harbin

XU Meng¹, JIN Liang², WEI Dan³, YIN Da-wei⁴, LI Yu-mei², WANG Wei², ZHANG Jiu-ming², HU Jun-xiang⁵

(1. Kedong Base of the Logistics Department of Shenyang Air Force, Keshan 161600, China; 2. Soil Fertilizer and Environment Resource, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/The Key Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition of Heilongjiang Province, Harbin 150086, China; 3. Plant Nutrition and Resources Institute, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 4. College of Agricultural Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 5. Air Force Agricultural New Technology Test and Training Base, Harbin 150090, China)

Abstract: Water footprint provides a new index system for evaluating agricultural water use during crop growth period in major soybean producing areas. In order to quantitatively evaluate the impact of water footprint composition and rainfall year types on soybean production, water footprint of soybeans in Harbin city (1986–2011) has been calculated using the CROPWAT model provided by FAO, through which the regulations changes of its composition distributed in different rainfall year type and the relationship between the footprint with soybean planting area/yields were investigated. The results showed that the components of soybean water footprint varied from 1986 to 2011. From the whole view, green water footprint took a large proportion in the total water footprint content, which ranged from 0.12 to $0.29 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; the agglomeration effect was found in water-deficient year type for blue water; The five years for containing the blue water were all belonging to the water-deficient year, and normal and rich years basically need no irrigation. The changes of water footprint from 1986 to 2011 showed the decreasing trend, the blue water ranged from 0.0174 to $0.0482 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, which accounted for 9.52% to 28.73% of water footprint. The index R^2 of quadratic equations showed that the relationship between effective rainfall and soybean yield per unit in wet- and dry-year could be described with quadratic function. The results of this study can provide a basis for the overall management of water and fertilizer in the major soybean producing areas of Heilongjiang province.

Keywords: Soybean; Water footprint; CROPWAT model; Rainfall type

在城市化进程加快的同时农业水资源管理也面临重大挑战。作为农业生产过程中的主要影响因子, 水肥资源的利用效率决定了农业生产的可持续性。近期学者们引入水足迹概念和评价方法, 分

别从概念拓展和应用前景方面开展研究。陈栓^[1]测算了 1996–2010 年中国各省市水足迹: 我国水资源分配不均衡, 虽然资源压力小, 压力指数仅为 $0.27 \sim 0.41$, 但其资源持续利用性仍面临着较大挑

收稿日期: 2018-10-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0201000, 2017YFD0200803); 黑龙江省自然科学基金 (ZD2017008); 中央引导地方专项 (ZY18A04); 国家自然科学基金 (41771284); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-004-PS21)。

第一作者简介: 徐猛 (1972–), 男, 学士, 农艺师, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: 877257501@qq.com。

通讯作者: 金梁 (1976–), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生物炭和水氮模型研究。E-mail: jinliang19762003@aliyun.com。

战。吴普特等^[2]指出,灌溉农业、旱作农业等不同划分条件下的水分利用效率评价指标在作物生产水足迹这个指标下得到了统一,为农业水资源管理提供了新的评价指标与工具。作物生产水足迹作为评价作物生产过程中水资源消耗类型、数量以及用水效率的综合指标,为农业水资源管理评价提供了全新的思路。蓝水、绿水、灰水是农业生产中的3个主要水资源类型。其中,蓝水是地表及地下水,存在于湖泊、河流、水库等中,是农作物生长所需的水资源总量;绿水即为土壤水分,存在于土壤非饱和含水层中,可直接为作物吸收利用,是作物利用的土壤中水含量的总和;灰水是在溶解稀释作物所需营养元素并不超出水质安全标准的水分,是容纳作物生长过程中产生的污染物所利用的水量^[3]。在农业生产过程中,作物生长所消耗的水分是蓝水与绿水的总和。CROPWAT模型是一款针对作物需水量、蒸发量、蒸腾量进行计算的模型,由联合国粮农组织土地与水发展司开发,可用来模拟计算改进灌溉模式,评价雨养条件下的作物生产等。

我国水足迹的研究起步较晚,各地区规模和结构受地方生产条件影响显著,对于东北非灌区/雨养农业区水足迹研究主要集中在辽宁和吉林,有专家^[4]对吉林省13年间的水稻生产足迹进行了研究,以国内外水足迹和虚拟水的研究现状为基础,将水稻水足迹分为蓝、绿、灰3种不同的水足迹,加之水足迹总量,对这4种水足迹的时间变异规律进行了分析计算,将降水年型分为枯水年、平水年和丰水年3种,分析4种水足迹与3种降雨年型的时空分异特征。张军等^[5]用生态足迹法对黑河流域7年间水资源负载、水足迹等的分析表明该地区水资源开发潜力较小,对水稻的灰水足迹汇总结果显示东部地区为其高聚集区,西部地区为其低聚集区;蓝水足迹汇总结果显示西部地区为水稻的高聚集区,东部地区为水稻蓝水足迹的低聚集区;在绿水足迹中,东部地区为其高度聚集区,西部地区的聚集程度则较低。秦丽杰等^[6]通过分析玉米生产水足迹的动态变化得出玉米水足迹中绿水足迹占比达80%,灰水足迹占比20%左右,蓝水足迹占比最小,不足1%。其中,极端干旱年份的有效水足迹为30%,降水较多年份的有效水足迹占70%,一般干旱的年份中,有效水足迹为50%,这将对土壤水分平衡带来不利影响。

综上所述,目前东北地区区域水足迹与农作物生长关系方面已有相关研究,且多数研究结果间的背景差异较大。对黑龙江省黑土农田区域的研究

较少,因此亟待开展黑土区农业生产中水足迹的研究。本文针对黑龙江雨养农业区域,对农业水资源利用中的虚拟水和水足迹利用进行分析,为农业水资源利用开辟新途径。研究旨在从降水效率的角度为黑龙江典型黑土区大豆农田的资源可持续利用提供理论借鉴和数据支持,为实现综合评价雨养地区农业降水效率和促进该地区农业降水资源高效利用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

联合国粮农组织 CLIMWAT 和 CROP 数据库(中国部分)<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>;CROPWAT 软件及相关参数来源于该网站和数据库;哈尔滨气象数据来源于中国气象局网站;哈尔滨大豆种植面积及产量来源于黑龙江省1985-2011年的统计年鉴。

1.2 试验设计

利用 CROPWAT 软件,计算大豆在单位面积内的灌溉量及有效降水量,得出单位面积内的大豆需水量,乘以哈尔滨市大豆种植的面积可计算本市大豆物的生长需水量。大豆生长需水量与大豆总产量的比值为大豆虚拟水量。当前对灰水足迹的研究表明,灰水足迹仅作为理论值存在,特指研究地区污染水体所需的水资源总量,该项指标或数据反映了研究区域水资源污染的程度。目前,灰水足迹在国内外计量方法尚未统一,且在实际研究中,区域当地的农业生产过程里,不能使用理论计算的水资源来稀释容纳当地的水体污染物。因此,在本文对哈尔滨大豆水足迹的研究中,仅以大豆蓝水及绿水足迹来计量。本研究首先将 CROPWAT 模型计算结果中26年间有效降雨量按频率出现,分为丰水年、平水年和缺水年,然后依据不同降雨年型的大豆生长期的水足迹组成进行归类分析,最终将降水资源26年间的有效性(蓝水和绿水)分布情况对大豆动态生产的影响进行年型空间摸底和分析,旨在为雨养地区水资源合理布局及水肥合理调控提供数据支持和理论借鉴。

1.3 方法

1.3.1 大豆虚拟水含量 作物的虚拟含水量由作物生长发育过程中的累积蒸腾水量(即作物生长需水量,CWR)计算而来,本研究采用 CROPWAT 软件计算虚拟含水量,计算方法依据联合国粮农组织(FAO)推荐的标准彭曼公式计算^[9],参数设置如表1。

表 1 CROPWAT 参数设置
Table 1 Crop Parameters of CROPWAT

	参数代码 Abbreviation	大豆参数值 MG4	定义 Definition	单位 Unit
日长敏感特征参数 Day length sensitivity traits parameters	CSDL	13. 09	临界日长(低于临界日长时生殖生长过程不受日长影响)	h
	PPSEN	0. 294	发育对光周期的时间相对响应斜率	h ⁻¹
物候特征参数 Growth traits parameters	EM-FL	19. 4	从出苗到初花所需要的光温日数, 即在最适宜温度和光照下的最短过程	Photothermal day
	FL-SH	7	从初花到第一个荚出现所需要的光温日数(R1-R3) , 即在最适宜温度和光照下的最短过程	Photothermal day
	FL-SD	15	从初花到初粒所需要的光温日数, 即在最适宜温度和光照条件下的最短过程	Photothermal day
	SD-PM	34	从幼粒到生理成熟所需要的光温日数, 即在最适宜温度和光照下的最短过程	Photothermal day
生长特征参数 Phenology traits parameters	FL-LF	26	指第一朵花出现至叶片生长结束所需要的光温日数	Photothermal day
	LFMAX	1. 03	在饱和光水平、最适宜温度条件下最大叶片光合作用速率	mg·m ⁻² ·s ⁻¹
	SLAVR	375	指代表性叶面积或营养生长高峰期通过环境因子修正的新叶比叶面积	cm ² ·g ⁻¹
	SIZLF	180	在标准生长条件下叶片(从上向下第三叶片) 完全展开的最大面积	cm ²
	XFRT	1	指日总光合产物分配到种子和豆荚中的最大比例(0~1)	
	WTPSD	0. 19	最大单粒重(在基质不受限制条件下)	g
	SDPDV	2. 2	标准生长条件下每荚平均籽粒数粒数	
	SFDUR	23	标准生长条件下, 子粒灌浆所经历的光温日数	Photothermal day
	PGDUR	10	在最佳条件下, 每增加一个完全豆荚所需要的光温日数	Photothermal day

蓝水和绿水是作物生产过程中的两个重要需水类型,即土壤水分及灌溉水分。其中,灌溉的需水量为作物生长需水量与有效降雨量之差。作物的虚拟含水总量为绿水虚拟水与蓝水虚拟水之和,其中,灌溉水量与作物产量的比值称为作物蓝水虚拟含水量,有效降雨量与作物产量的比值称为绿水虚拟含水量。本文旨在说明大豆生产中降雨效率和产量关系,不涉及环境影响问题,在计算中没有考虑灰水足迹。

具体计算公式:IR = CWR-ER,ER≥CWR 时,IR = 0,农作物蓝水虚拟水含量为 0,绿水虚拟水含量为 $VW_g = CWR/Y$;当 ER < CWR 时,农作物蓝水虚拟水含量为 $VW_b = IRY$,绿水虚拟水含量为 $VWg = ERY$ 。 $VW_{prod} = VW_g + VW_b$ 。式中 IR(irrigation water consumption) 为灌溉用水量;CWR(crop water requirement) 为作物需水量;ER(effective rainfall) 为有

效降雨量; VW_{prod} (virtual water content in agriculture production) 为农产品的虚拟水含量; VW_g (virtual water content in green water) 为绿水虚拟水含量; VW_b (virtual water content in blue water) 为蓝水虚拟水含量;Y(yield) 为作物产量。

1. 3. 2 大豆生产水足迹 哈尔滨地区大豆生长过程中所消耗的水资源总量即为蓝水、绿水、灰水足迹的总和,公式为 $WF_{prod} = WF_{prod, green} + WF_{prod, blue} + WF_{prod, grey}$, 式中: WF_{prod} 为作物生产水足迹; $WF_{prod, green}$ 为绿水足迹; $WF_{prod, blue}$ 为蓝水足迹; $WF_{prod, grey}$ 为灰水足迹。本研究中没有考虑有灰水足迹。

1. 4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据的计算与处理,采用 IBM SPSS Statistics20. 0 统计分析软件进行单因素方差分析和制图。在 $P < 0. 05$ 水平下

用 LSD 法分析数据。

2 结果与分析

2.1 哈尔滨 1986 – 2011 年大豆水足迹组成分析

2.1.1 各年降水量分析 如表 2 所示,1986 – 2011 年哈尔滨地区大豆有效降雨量为 211.6 ~ 422.4 mm,26 年间有效降雨量按频率出现,分为有效降雨量为 357.6 ~ 422.4 mm 的丰水年,有效降雨量为 307.2 ~ 357.6 mm 的平水年,有效降雨量为 211.6 ~ 298.6 mm 的缺水年。大豆生长消费用水总量为 294 ~ 422 mm,灌溉需水量只有 5 年(1989、1993、1997、2000 和 2001 年)为正值,其余年份均为负值,说明 26 年间哈尔滨只有 5 年由于雨量分布不均导致大豆生育期内作物需水量大于有效降雨量,有必要进行灌溉。

2.1.2 大豆生产水消耗量和虚拟水含量分析 从表 3 可以看出,从虚拟水的角度看,1986 – 2011 年大豆虚拟水含量为 $3.53 \times 10^8 \sim 38.23 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{年}^{-1}$,由于 26 年中只有 5 年的灌溉需水量为正值,即这 5 年的绿水为正值,其余年份均为零,绿水范围为 211.6 ~ 422.4 mm,蓝水的范围为 31.4 ~ 85.3 mm,而哈尔滨大豆年产量为 $5.9 \times 10^4 \sim 115.8 \times 10^4 \text{ t}$,种植面积从 1986 年的 54 676 hm^2 至 2011 年的 283 557 hm^2 ,增长了 418%,而单位面积产量由 1.44 $\text{t} \cdot \text{hm}^2$ 增长至 2.55 $\text{t} \cdot \text{hm}^2$,增长了 30.5%。单位面积产量增长趋势和降水量呈正相关关系。1986 年以来,哈尔滨市大豆水足迹基本呈下降趋势,以 1994 为分界线,1998 和 2007 年分阶段递减下降,2007 年下降趋势变缓,趋于平稳。

表 2 1986 – 2011 年哈尔滨市大豆生长消耗用水
Table 2 Water consumption and consumption of soybean in Harbin during 1986 – 2011 (mm)

年份 Year	作物需水量 CWR	有效降雨量 ER	灌溉需水量 IR
2011	306.9	368.7	–61.9
2010	308.9	343.7	–34.8
2009	297.1	315.3	–18.3
2008	301.5	349.9	–48.4
2007	310.4	347.3	–36.9
2006	296.7	322.8	–26.1
2005	285.8	294.4	–8.6
2004	313.6	402.9	–89.3
2003	280.0	307.2	–27.3
2002	300.2	310.9	–10.7
2001	330.6	265.4	65.2
2000	330.0	298.6	31.4
1999	316.5	357.1	–40.6
1998	296.3	399.2	–102.9
1997	324.3	288.1	36.1
1996	311.8	357.6	–45.8
1995	137.1	283.3	37.8
1994	321.4	409.1	–87.7
1993	296.9	211.6	85.3
1992	307.3	381.9	–74.6
1991	316.5	422.4	–105.9
1990	309.4	387.9	–78.5
1989	316.3	263.4	52.9
1988	307.4	417.0	–109.5
1987	298.9	386.6	–87.7
1986	298.7	349.6	–50.9

表 3 1986 – 2011 年哈尔滨市大豆生产水消耗量和虚拟水含量

Table 3 Water consumption and virtual water content of soybean production in Harbin during 1986 – 2011

年份 Year	水消耗量 Water consumption			大豆年产量 Annual soybean yield /(× 10 ⁴ t)	大豆种植面积 Soybean planting area /(× 10 ⁵ hm ²)	大豆单位产量 Soybean yield /(t·hm ⁻²)	虚拟水含量 Virtual water		
	per year/(× 10 ⁸ m ³)						consumption/(m ³ ·kg ⁻¹)		
	蓝水 Blue water	绿水 Green water	总量 Total consumption				蓝水 Blue water	绿水 Green water	总量 Total consumption
2011	0	10.45	38.23	72.35	2.83	2.55	0	0.14	0.14
2010	0	13.29	34.20	98.67	3.87	2.55	0	0.13	0.13
2009	0	12.73	29.93	92.61	4.04	2.29	0	0.14	0.14
2008	0	14.71	28.35	98.52	4.20	2.34	0	0.14	0.14
2007	0	15.62	27.10	64.50	4.50	1.43	0	0.24	0.24
2006	0	15.22	24.51	91.10	4.71	1.93	0	0.17	0.17
2005	0	15.03	18.40	113.60	5.11	2.22	0	0.13	0.13
2004	0	20.84	24.30	115.80	5.17	2.24	0	0.18	0.18
2003	0	11.49	15.57	79.60	3.74	2.13	0	0.14	0.14
2002	0	9.03	16.72	64.90	2.90	2.24	0	0.14	0.14
2001	1.97	8.03	17.84	52.70	3.02	1.74	0.03	0.15	0.18
2000	1.05	10.03	16.22	60.70	3.36	1.81	0.02	0.17	0.19
1999	0	8.44	23.77	50.40	2.36	2.13	0	0.17	0.17

续表 3

年份 Year	水消耗量 Water consumption			大豆年产量 Annual soybean yield /(× 10 ⁴ t)	大豆种植面积 Soybean planting area /(× 10 ⁵ hm ²)	大豆单位产量 Soybean yield /(t·hm ⁻²)	虚拟水含量 Virtual water		
	per year/(× 10 ⁸ m ³)						consumption/(m ³ ·kg ⁻¹)		
	蓝水 Blue water	绿水 Green water	总量 Total consumption				蓝水 Blue water	绿水 Green water	总量 Total consumption
1998	0	10.61	25.90	50.70	2.65	1.91	0	0.21	0.21
1997	0.92	7.29	21.06	53.70	2.53	2.12	0.02	0.14	0.16
1996	0	4.03	9.89	24.50	1.13	2.17	0	0.16	0.16
1995	0	3.71	7.44	25.00	1.31	1.91	0	0.15	0.15
1994	0	6.61	9.08	30.50	1.62	1.89	0	0.22	0.22
1993	1.65	4.08	5.57	33.90	1.93	1.76	0.05	0.12	0.17
1992	0	5.21	8.50	25.30	1.36	1.85	0	0.21	0.21
1991	0	5.34	9.66	20.60	1.26	1.63	0	0.26	0.26
1990	0	1.86	5.07	8.90	0.48	1.86	0	0.21	0.21
1989	0.28	1.42	3.54	5.90	0.54	1.10	0.05	0.24	0.29
1988	0	2.33	4.40	7.80	0.56	1.40	0	0.29	0.29
1987	0	1.91	4.84	7.70	0.49	1.56	0	0.25	0.25
1986	0	1.91	3.80	7.86	0.55	1.44	0	0.24	0.24

与蓝水相比,绿水对环境的影响较小,对生态环境的污染也较小^[7-8]。绿水的影响因子较多,包括气候条件、作物种类、土壤质地、耕作管理措施等。针对哈尔滨地区 26 年间的大豆水足迹研究显示,有 5 个年份大豆生长期内有灌溉需求,这 5 个年份均分布在欠水年份里,哈尔滨在欠水年大豆生长用水以绿水为主,绿水比例在 71% ~ 90% 范围内,而蓝水则为 9.5% ~ 28.7%。其中蓝水与绿水的比值范围约为 4:1 (2001)、10:1 (2000)、8:1 (1997)、5:2 (1993)、5:1 (1989),这可能与大豆的生长特点

及大豆生长周期有关。

2.2 大豆水足迹评价

2.2.1 降雨年型和 大豆产量关系模型

图 1 所示,在丰水年、平水年和欠水年分别建立了不同有效降雨年型与该年型下大豆产量回归模型,经过比较,从幂函数、指数函数、对数函数、多项式和线性函数中优选出一元二次方程为最佳拟合模型,从方程的系数和 R^2 来看,各年型与大豆生产能力均呈现正相关关系,从相关系数角度,在丰水年和欠水年降雨量对大豆产量的影响更接近于一元二次关系。

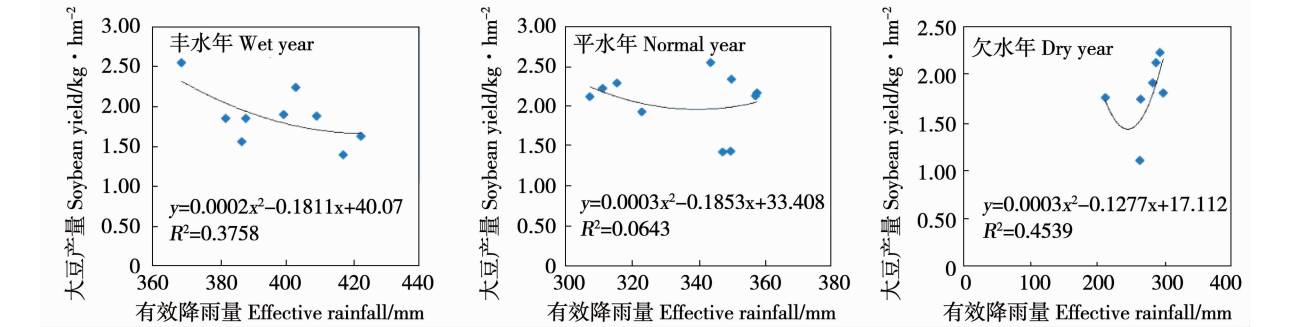


图 1 不同有效降雨年型和 大豆产量的线性回归模型

Fig. 1 Linear regression model of different effective rainfall years and soybean yield

2.2.2 26 年间哈尔滨大豆生产水足迹评价

在本研究中,26 年间,蓝水足迹均发生在欠水年,即其余年型的蓝水足迹为 0,绿水足迹与大豆生产水足迹是等值的。绿水足迹在研究地区的大豆生产水足迹中占 71% 以上,而蓝水足迹则占比较小,在总生产水足迹中占比不足 29% (图 2)。蓝水足迹比例较小在雨养农业中表示一般情况下自然降水基本满足作物正常生育期的需要,但是如果在雨量分配不均匀的特殊年份,蓝水足迹则表示作物获得正常

产量需要补充灌溉的需水量。

从图 3 可以看出,除了个别年份外(2004 年),大豆种植面积从 1986 年至 2011 年基本呈线性增长,而面积趋势线方程为 $y = -17\ 913x + 496\ 584$, $R^2 = 0.787\ 9$,而绿水消耗量从 1986 年开始也基本上呈阶段性增长,其趋势线方程为 $y = -0.597\ 4x + 16.574$, $R^2 = 0.748\ 2$,整体上而言大豆水消耗量与种植面积基本成正相关关系。

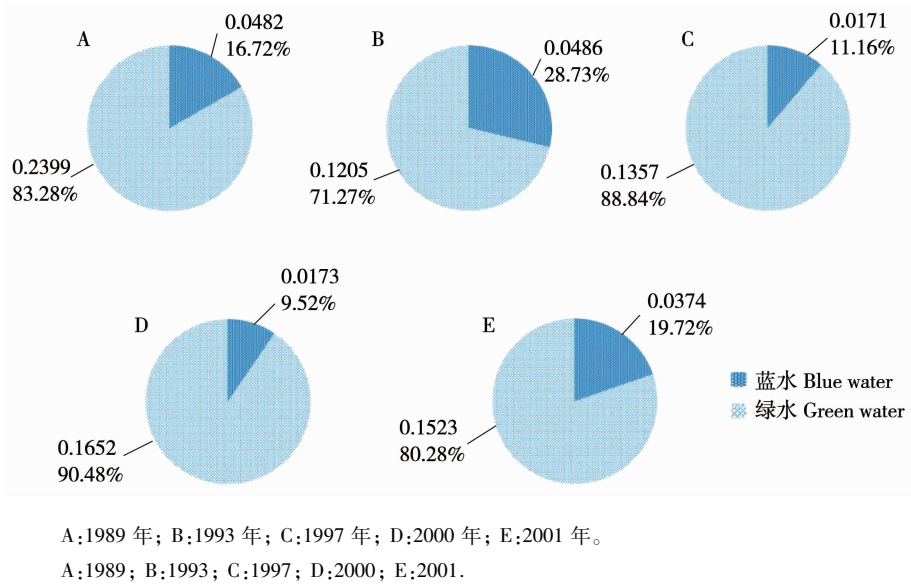


图 2 欠水年虚拟水组成饼图
Fig. 2 Pie chart of water footprint in water deficit year

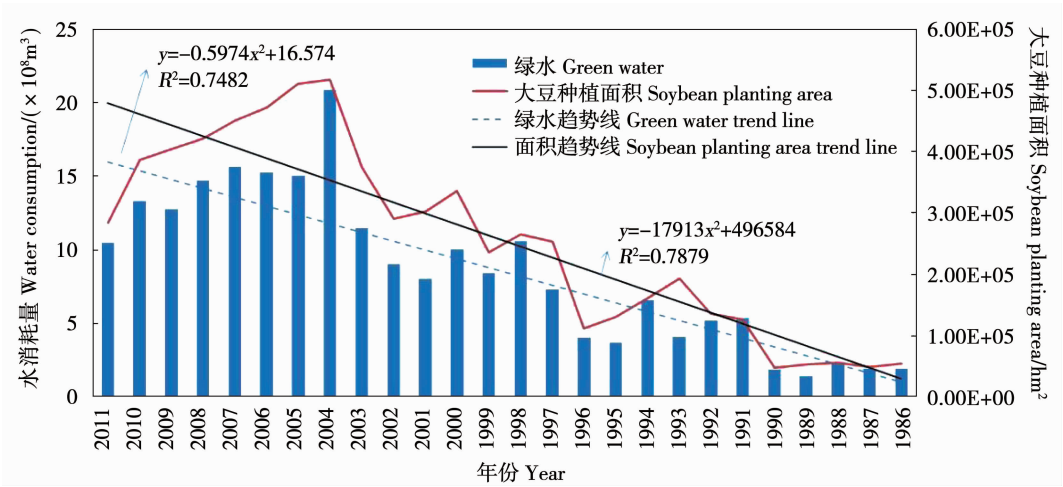


图 3 1986-2011 年绿水足迹与大豆种植面积变化的回归模型
Fig. 3 Regression model of green waterfoot print and soybean planting area during 1986-2011

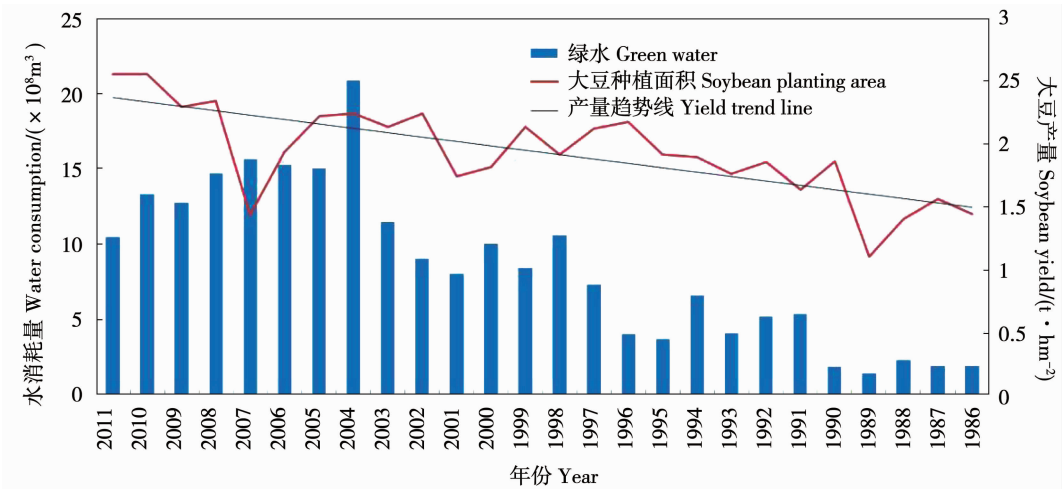


图 4 1986-2011 年绿水足迹与大豆产量变化趋势
Fig. 4 Trend of green water footprint and soybean yield during 1986-2011

从图 4 可以看出,大豆单位面积产量从 1986 年至 2011 年逐渐呈递增的趋势,为 $1.10 \sim 2.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 1986–1995 年基本均在 $1.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以内,而 1998–2011 年则均在 $2.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。26 年内单位产量下绿水消耗量呈现一定幅度减少,从 $0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 逐渐降至 $0.14 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,从 1986 年开始每个 5 年平均绿水值为 $0.24, 0.19, 0.16, 0.14, 0.16$, 2006 年降低至 0.14 后又略升为 2011 年的 0.16 ,说明 $0.16 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 的虚拟水含量是较为稳定的阈值。

3 讨 论

当有效降雨量与作物需水量的差值小于 0 时,指示着作物需要灌溉来补充,自然降水已经不能满足作物生长需求;当有效降雨量–作物需水量 > 0 时,不需要额外进行灌溉,自然条件下的水量盈余,降雨能够满足作物生长发育所需。哈尔滨地区单位面积内大豆产量从 1986 年起开始呈增加趋势,单位面积内大豆水足迹相应下降。单位面积内的大豆产量与其水足迹呈现负相关性,单位面积内大豆水足迹随大豆产量的提升而降低,随产量下降而提高。哈尔滨地区的降水资源利用率有了显著提升。大豆生长所需的虚拟水量大大提升,单位面积水足迹也随之提升。26 年间,有 5 年自然降水不能满足作物生长需求,而哈尔滨当地大豆种植是雨养农业为主,这 5 个年份有效降雨量范围为 $265.4 \sim 316.3 \text{ mm}$,所需灌溉水量范围在 $31.4 \sim 85.3 \text{ mm}$,然而这 5 个年份产量值约为 26 年平均产量的 $56\% \sim 108\%$,说明当地农业管理措施下大豆生长过程中抵御水分胁迫的能力决定产量的变化。

哈尔滨市 26 年大豆产量和绿水变化关系说明,近年来,伴随着我国农业科技的改善和提升,我国农业生产水平有了大幅度提升,随着农业种植技术的提高,包括品种筛选、施肥技术,耕作管理等农业措施,大豆的生产技术也随之大大提高。在此科技发展的背景之下,哈尔滨地区的农业管理模式有了改进和创新,生产能力提高,农田地力在科技生产、科学管理施肥的条件下有了明显提升,生产效率显著增强,单位面积大豆产量大幅度提高。大豆品种的筛选及优化使之更加适应当地种植条件及土壤环境,也是大豆产量提升的主要原因之一。同时降雨利用率在先进农业管理措施下同步提高,哈尔滨地区大豆生产过程中随着科技的发展和科学技术的应用,在大豆播种和开花及收获期间利用大中型机械秋天旋耕起垄镇压,大豆收割机的高效作业,根茬还田及秸秆等有机物料投入进行培肥保墒,有效降低了降水过程中的水分损耗,减少了大豆生长过程中的需水量,提升了水资源的利用率,大大降

低了大豆生长需水量。

4 结 论

本文对哈尔滨地区 1986–2011 年 26 年间的大豆生产水足迹进行了分析,解析了大豆生产中的需水来源,同时也明确了不同生产年份间的大豆生产水足迹变化规律。通过分析明确了大豆生产过程中水资源分布情况对大豆生产的影响,为在农业生产中解决水资源供应矛盾提供了理论依据。在各类水资源中,绿水资源是大豆生产中的主要需水来源,需将绿水资源的保护与施行合理有效的农艺措施相结合,才可使大豆生产实现可持续发展。同时,本文的研究明确了哈尔滨地区雨养农业在本地区粮食安全中的重要作用。

参考文献

- [1] 陈栓. 中国 1996–2010 年省际水足迹研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013. (Chen S. Study on water footprint on provincial scale in China from 1996 to 2010[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2013.)
- [2] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 651–660, 669. (Wu P T, Sun S K, Wang Y B, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651–660, 669.)
- [3] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, et al. 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 Economics, 2006, 60: 186–203.
- [4] 杨婷. 吉林省水稻生产水足迹地域分异研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015. (Yang T. Regional differentiation of water footprint of rice production in Jilin province[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015.)
- [5] 张军, 周冬梅, 张仁陟. 黑河流域 2004–2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J]. 中国沙漠, 2012(6): 1779–1785. (Zhang J, Zhou D M, Zhang R Z. Dynamic characteristics of water footprint and water resources carrying capacity in Heihe river basin from 2004 to 2010 [J]. Desert of China, 2012(6): 1779–1785.)
- [6] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 吉林省西部玉米生产水足迹研究[J]. 地理科学, 2012(8): 1020–1025. Qin L J, Jin Y H, Duan P L. Study on water footprint of maize production in Western Jilin Province [J]. Geographic Science, 2012(8): 1020–1025.
- [7] 张燕, 徐建华, 吕光辉. 西北干旱区新疆水资源足迹及利用效率动态评估[J]. 中国沙漠, 2008(4): 775–780. Zhang Y, Xu J H, Lu G H. Dynamic assessment of water resources footprint and utilization efficiency in northwest arid region of Xinjiang [J]. Desert of China, 2008(4): 775–780.
- [8] 韩舒, 师庆东, 于洋, 等. 新疆 1999–2009 年水足迹计算与分析[J]. 干旱区地理, 2013(2): 364–370. Han S, Shi Q, Yu Y, et al. Calculation and analysis of water footprint in Xinjiang from 1999 to 2009 [J]. Arid Land Geography, 2013(2): 364–370.