

基于水足迹的节水型城郊种植业结构优化研究

——以乌鲁木齐市为例

李啸虎¹, 杨德刚²

(1. 新疆财经大学 旅游学院, 乌鲁木齐 830012; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:干旱区城郊种植业的发展进一步加剧了当地水资源短缺,水足迹方法能够完整、清晰描述作物耗水特征,基于水足迹进行种植业结构调整对于干旱区种植业持续健康发展和水资源合理高效利用具有重要的指导意义。以干旱区绿洲城市乌鲁木齐市为例,估算当地农作物水足迹,并以此为基础综合考虑经济、生态和社会等因素,构建了基于水足迹的多目标优化模型,探讨节水型城郊种植业结构调整路径。研究表明:可持续发展模式具有蓝水、灰水足迹较低、收益较高、耕地规模适宜的特点,可作为种植业发展规划的基础方案。根据此方案,预计到2015年,种植面积将控制在 $6.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 之内,粮油作物、果蔬作物和其他作物的比例为35:49:16。就目前而言,应通过调减高蓝水消耗的粮油作物面积,增加低耗水的果蔬类作物面积,提高农肥利用率等措施来提高种植业用水效率、降低水污染,实施结构优化。

关键词:水足迹;城郊种植业优化;线性规划模型;乌鲁木齐市

中图分类号:F323.213;F326.1;X824

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0298-07

Study of the Structure Optimization of Water-Saving Suburban Cropping in Arid Lands Based on the Water Footprint —A Case Study in Urumqi City

LI Xiaohu¹, YANG Degang²

(1. College of Tourism, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China;

2. Xijiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Cropping systems have been developed in the outskirts of oasis cities, which had intensified water scarcity. The water footprint method can be used to comprehensively and clearly describe the characteristics of crop water consumption, and can be used as a guide to develop sustainable cropping and suitable use of water resources by adjusting cropping structure based on the water footprint in arid land. We selected Urumqi City as a typical oasis city in the arid area. We analyzed the water consumption of crops in Urumqi City using the water footprint model, and considered the factors of economy, ecology, and society. A new multiobjective programming (MOP) model of planting structure was generated based on the water footprint in order to analyze adjustment programs for water-saving suburban planting in arid lands. This study revealed the following findings. The sustainable project had characteristics of a low blue and grey footprint, higher profit, and suitable farmland scale. Urumqi City can focus on the following approaches in order to optimize its cropping structure. Based on the results of the study, the total cropping area in 2015 should be limited to approximately $6.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$, with a ratio of 35:49:16 of grain and oil crops, fruits and vegetable crops, and other crops. The first objective in the near future is to reduce the planting areas growing crops with high consumption of blue water, such as grain and oil crops. The second is to increase the acreage of fruits and vegetables utilizing less blue water. In addition, the rate of fertilizer utilization should be improved. Thus, the water use efficiency of cropping systems can be improved and water pollution can be reduced in order to achieve structural optimization.

收稿日期:2015-10-03

修回日期:2015-10-20

资助项目:新疆财经大学博士启动基金“资源与环境约束下区域旅游业效率测度与全要素生产率评价”(2015BS001)

第一作者:李啸虎(1978—),男,新疆乌鲁木齐人,博士,副教授,主要从事水资源利用与区域可持续发展研究。E-mail:361196358@qq.com

通信作者:杨德刚(1962—),男,新疆阜康人,研究员,主要从事区域发展研究。E-mail:dgyang@ms.xjb.ac.cn

Keywords: water footprint; optimization of suburban planting; model of linear programming; Urumqi City

水是绿洲可持续发展的核心要素。随着干旱区城市人口的持续增加和城市经济的不断发展,对水资源的需求也在快速增长。城郊种植业发展在占用大量水资源的同时造成了植被退化、工业与生活供水不足等问题,不仅威胁着绿洲生态系统的稳定,而且严重制约了城市社会经济的发展。因此,分析种植业产品耗水特征并以此为基础优化作物品种结构,挖掘种植业内部节水潜力,建立节水型种植结构,对于高效利用水资源,维护绿洲生态系统的安全,保障区域社会、经济的可持续发展具有重要的意义。

以往种植业优化研究仅从作物灌溉用水角度来估算作物耗水量,并以此为基础调整种植结构^[1-3],由于无法全面反映作物耗水的类型和程度,因而影响了优化方案的实际指导价值。水足迹分析方法较好地解决了作物耗水的核算问题,其核算账户不仅包括作物生长期对地表、地下水的消耗量(蓝水足迹),而且涵盖了作物对自然降水的直接利用量(绿水足迹)及稀释农肥施用对自然水体污染的水量(灰水足迹),完整、清晰地刻画了种植业发展对水资源的真实占有程度。目前,国外相关研究主要集中在全球主要农产品水足迹量化研究^[4-7]、国家间农产品虚拟水战略研究^[8-10]两个方向。国内主要聚焦于西北干旱地区种植业虚拟水评价及结构优化研究^[11-14]方面。回顾以往成果,存在两点不足:(1) 国外研究尺度较宏观,缺乏微观尺度上市、县及以下区域种植业水足迹量化及优化的案例研究,国内相关研究集中在宁夏、甘肃两省,缺乏对其他干旱地区基于水足迹的种植业优化问题探讨;(2) 国外种植业结构优化定性研究较多,定量研究较少,国内优化研究中只核算了农产品的蓝、绿水消耗及其对未来种植业结构调整的影响,还未核算农产品的灰水足迹并将其作为影响种植结构的约束条件,因而优化方案无法明确反映结构调整对周边水生态环境影响的变化程度。有关新疆的水足迹研究也存在类似问题^[15-16],水足迹研究成果较少且主要集中在全疆或大区域层面,研究内容只是核算了农产品水足迹总量,未根据水源种类进行细分,以上不利于政府和职能部门把握新疆种植业水足迹特征及制定未来种植业调整的方案。鉴于此,本文选择干旱区城市乌鲁木齐市为典型案例区,在核算其种植业绿、蓝、灰水足迹的基础上建立多目标规划模型,模拟不同情境下未来城郊种植业耗水特征及其影响,并选择优化方案,以期为干旱区城郊种植业可持续发展提供决策参考和科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市位于新疆维吾尔自治区中北部,天山北麓中段,准噶尔盆地南缘,地处 $42^{\circ}54'16''$ — $44^{\circ}58'16''$ N, $86^{\circ}46'10''$ — $88^{\circ}59'48''$ E,地形东、南、西三面环山,地势南高北低、起伏悬殊,平均海拔 800 m,总面积 1.38 万 km^2 。夏季炎热短暂,冬季酷寒漫长,寒暑变化剧烈,昼夜温差大,年均气温 6.4°C ,年均降水量 280 mm,而蒸发量却达 2 730 mm,属典型大陆干旱型气候区。乌鲁木齐市地表水资源总量平均为 11.38 亿 m^3 ,偏丰年可达到 14.94 亿 m^3 ,偏枯年亦有 8.56 亿 m^3 ,其中地表水资源平均为 10.50 亿 m^3 ,地下水资源平均为 6.14 亿 m^3 ^[17-18]。

乌鲁木齐市种植业分布于城市外围地带,属典型的内陆干旱区城郊型种植业,主要种植小麦、水稻、玉米、大麦、豆类、油料、薯类、蔬菜、棉花、苜蓿、甜菜和水果 12 种农作物,近年来,随着城市化进程的不断加速,水资源供需矛盾日益突出,城郊型种植业耗水占城市生产性总耗水的 63%,不合理的种植模式导致了水资源的大量消耗,使区域内的生态环境受到严重破坏,同时严重阻碍了工业和城市化进程的发展。

1.2 数据来源

本文以 2011 年乌鲁木齐市种植业相关数据为基础,研究 2015 年种植业发展模式。选取小麦、水稻等 12 种乌鲁木齐市农作物产品进行水足迹估算,研究所需的气候数据采用联合国粮农组织的 CLIMWAT 数据库中有关乌鲁木齐市的气候数据;作物播种期、收获期数据由安宁渠、永丰渠等农作区实际调查资料整理所得,作物系数由新疆农业科学院作物所提供,作物年播种面积和产量数据来自《乌鲁木齐市统计年鉴》(2006—2012 年)^[19],其中大麦数据由乌鲁木齐市农牧局农牧处提供,作物单价为中国农业信息网(www.agri.gov.cn)和中国养殖网(www.yz88.org.cn)2010 年 1—12 月各月月末交割价格的平均值;水资源和降水总量来自《乌鲁木齐市水资源公报》(2005—2011 年)^[20],耕作区土壤条件通过走访乌鲁木齐县农业技术推广站,同时结合相关研究成果^[21-23]可得,乌鲁木齐市耕作区主要分布于该市南郊和北郊的乌鲁木齐县和米东区,耕地土壤主要类型有灌耕土、灌耕潮土、灌耕灰漠土、灌耕棕钙土,成土母质主要为洪积物、冲积物、坡积物、潮积物和冰水沉积物,土壤质地大部分为壤土、少数为砂土和黏土,耕作层

容重约为 $1.3 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$, 田间持水量(按体积计)约为 $8.45\% \sim 33.12\%$ 。

2 研究方法

2.1 作物水足迹

2.1.1 作物绿、蓝水足迹 为了精确模拟乌鲁木齐市农作物生长期绿、蓝水的消耗量, 根据当地气候、土壤特点, 本文以 FAO 发布的 CropWat 8.0 软件为计算工具, 采用其中的灌溉制度法模块模拟作物生长期实际耗水量, 并估算作物绿、蓝水足迹, 具体步骤包括: (1) 通过 Penman-Monteith 公式计算参考作物每日需水量; (2) 在考虑土壤有效水分对作物每日耗水影响的基础上, 计算作物每日净灌溉需求量、实际灌溉需求量和实际总蒸发量, 其中: 土壤有效水分影响程度根据土壤有效水分计算方程和土壤水分平衡方程计算得出的土壤每日最大有效含水量和土壤每日有效含水量两项值求商获得; (3) 累加得到作物生长期总净灌溉需求量、总实际灌溉需求量和总实际蒸发量, 取总净灌溉需求量和总实际灌溉需求量中的最小值作为作物蓝水需求量, 并由总实际蒸发量和作物蓝水需求量的差得到作物绿水需求量; (4) 将作物绿、蓝需求量乘以作物播种面积除以总产量得到单位产量作物绿、蓝水足迹。

2.1.2 作物灰水足迹 作物灰水足迹是指稀释由化肥、农药造成的水体氮磷富营养化并使水质达到环境水质标准的淡水质量^[24]。作物 i 生长期单位灰水足迹的估算采用《水足迹评价手册 2011》^[25] 当中有关农作物生长期灰水足迹方法计算:

$$WF_{greyi} = \frac{(a_i AR_i) / (c_{max} - c_{net})}{y_i} \quad (1)$$

式中: WF_{greyi} 表示作物 i 的单位产量灰水足迹 (m^3/kg); AR_i 表示作物 i 的单位面积耕地化肥施用量 (kg/hm^2); a_i 为作物 i 的淋溶率(即进入水体的污染量占总化学物质施用量的比例); c_{max} 为自然水体可容纳的最大污染物浓度 (kg/m^3); c_{net} 为自然水体本底污染物浓度 (kg/m^3); y_i 表示作物 i 单位面积年产量 (kg/hm^2)。这里, 由于数据的局限性, 考虑到水体中过剩的氮元素是较难稀释的污染物^[26], 因而, 以稀释氮元素的耗水量为代表估算作物的灰水足迹。通过对研究区农作区的实际调查, 氮肥每公顷施用量为 225 kg , 根据相关研究成果^[24-25, 27], 淋溶率设定为 0.1 , 水质自然本底浓度假定为 0 , 最大容纳浓度定为 10 mg/L ,

2.2 多目标种植结构优化模型

2.2.1 目标函数 在现有生产条件下, 以种植业总收益最大、水足迹量最小为目标建立多目标种植结构

优化模型, 如下:

$$\max Z_{GE} = \sum_{i=1}^{12} x_i y_i E_i \quad (2)$$

$$\min WF = \sum_{i=1}^{12} (WF_{greeni} + WF_{bluei} + WF_{greyi}) x_i y_i \quad (3)$$

式中: Z_{GE} 表示种植业年度总收益 (元/a); WF 表示种植业年度总水足迹 (m^3/a); x_i 表示作物 i 的耕地面积 (hm^2); y_i 表示作物 i 单位面积产量 (t/hm^2); E_i 表示作物 i 单价 (元/kg), WF_{greeni} , WF_{bluei} , WF_{greyi} 分别表示单位产量作物 i 的绿、蓝和灰水足迹 (m^3/kg)。

2.2.2 约束条件

(1) 耕地总面积约束

$$\sum_{i=1}^{12} x_i \leq A_{optim} \quad (4)$$

$$\text{作物 } i \text{ 耕地比重: } e_i \leq \frac{x_i}{A_a} \leq d_i \quad (5)$$

(2) 水资源约束条件

$$\text{农作物绿水足迹约束: } \sum_{i=1}^{12} WF_{greeni} y_i \leq W_{green} \quad (6)$$

$$\text{农作物蓝水足迹约束: } \sum_{i=1}^{12} WF_{bluei} y_i \leq W_{AA} \quad (7)$$

(3) 水环境约束条件

$$\text{农作物灰水足迹约束: } \sum_{i=1}^{12} WF_{greyi} y_i \leq WF_{grey}(t) \quad (8)$$

式中: A_{optim} 表示合理耕地总面积 (hm^2); A_a 表示实际耕地总面积 (hm^2); e_i, d_i 分别代表作物 i 耕地面积比重的下限和上限; W_{green} 表示可供种植业利用的绿水总量 (m^3); W_{AA} 表示可供种植业利用的蓝水总量 (m^3); $WF_{grey}(t)$ 表示第 t 年的种植业灰水总量 (m^3/a); i 为第 i 种作物。

2.2.3 参数估算 约束条件中可供种植业利用的绿水总量 (W_{green})、蓝水总量 (W_{AA}) 和合理耕地面积 (A_{optim}) 按以下思路估算。根据生态水文学的观点^[28], 降水总量由蓝水和绿水两部分组成, 其中绿水是指自然降水赋存于土壤非饱和含水层并能以蒸散的形式为植物利用的水资源, 而蓝水则是自然降水赋存于河流、湖泊、水库、池塘及蓄水层中的地表水和地下水。因此, 供种植业利用的绿水总量 (W_{green}) 可以理解为种植业可以利用的区域降水总量减去区域地表、地下水量(不含外调水)后的水资源量, 见公式(9)。根据 Aldaya 等^[25] 学者的观点, 可供种植业利用的蓝水总量 (W_{AA}) 为满足区域生态环境需水及工业、生活用水之后剩余的区域地表、地下水资源量, 见公式(11)。合理耕地规模采用王忠静等^[29] 基于水热平衡关系提出的测算方法, 见公式(12)。

$$W_{green} = (P_G - W_G) \frac{CA}{TA} \quad (9)$$

$$W_{AA}=(W_G-EWD)\beta \tag{10}$$

$$A_{\text{optim}}=\frac{W-W'}{(ET_0-r)K_pH_0}K_1 \tag{11}$$

式中： P_G 表示年总降水量 (m^3/a)； CA 表示耕地面积； TA 表示土地总面积； W_G 表示地区年水资源总量 (m^3/a)； EWD 表示年生态环境需水量 (m^3/a)，对 EWD 的估算采用刘昌明院士提出西北干旱区生态需水量应占水资源总量 50% 的标准计算； β 表示种植业用水比重，据 2005—2011 年《乌鲁木齐市水资源公报》^[19] 数据计算得出，种植业用水比重平均值为 62.2%，同时，乌鲁木齐市政府明确，到 2015 年种植业用水比重控制到 60% 以下，因而，本文 β 设定为 0.6； W 表示年均水资源消耗总量 (m^3/a)； W' 表示用于工业和人畜生活的水量 (m^3/a)； ET_0 表示参考作物蒸散量 (mm/a)； r 表示年降水量 (mm)； K_p 表示主要植物的综合植物系数，一般通过作物系数加权平均获得； H_0 为绿洲设计“绿度”，主要考虑绿洲周围的自然环境、受人工维护与干扰的程度，可定为 0.75~1^[29]。

3 结果与分析

3.1 乌鲁木齐市作物水足迹

按照上述思路依次计算出 2011 年乌鲁木齐市种植业产品的单位产量绿水、蓝水和灰水足迹(表 1)，

表 1 乌鲁木齐市作物水足迹及经济指标

作物	绿水足迹/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	蓝水足迹/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	灰水足迹/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	作物单产/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	作物单价/ (元 $\cdot \text{kg}^{-1}$)	种植面积/ hm^2	耕地比重	
							下限	上限
小麦	0.24	0.80	0.23	5.11	1.90	10830	0.102	0.225
水稻	0.07	0.75	0.16	9.22	2.14	6701	0.086	0.129
玉米	0.12	0.53	0.17	8.85	2.20	4420	0.021	0.064
大麦	0.3	1.01	0.4	3.74	2.30	3249	0.031	0.067
豆类	0.25	1.09	0.39	3.81	4.00	1150	0.011	0.025
油料	0.42	1.92	0.67	2.42	4.50	4000	0.026	0.086
薯类	0.04	0.24	0.07	22.97	1.40	6350	0.054	0.091
蔬菜	0.02	0.09	0.03	30.02	3.74	25340	0.31	0.438
棉花	1.34	5.76	1.26	1.19	8.80	1610	0.012	0.06
苜蓿	0.42	0.53	0.27	5.65	1.20	2600	0.037	0.09
甜菜	0.02	0.08	0.02	75.78	0.44	200	0.001	0.007
水果	0.10	0.21	0.09	23.2	5.00	3109	0.022	0.102

表 2 2005—2011 年乌鲁木齐市种植业水资源量数据及 2015 年规划值 10^8 m^3

指标	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2015 年
种植业可用绿水总量	1.05	0.84	1.50	0.60	0.59	0.59	0.90	0.99
种植业可用蓝水总量	3.15	2.57	3.56	3.00	3.53	2.82	2.81	2.83
水资源总量	10.50	8.60	11.90	10.0	11.8	9.40	9.40	9.52

由公式(11)求得乌鲁木齐市适宜耕地规模为 5.24~6.99 万 hm^2 (表 3)，研究区 2011 年实际耕地面积为 6.96 万 hm^2 ，为避免扩大耕地规模而挤占更多水资源，将 2015 年耕地规模规划值设定为 2011 年值。

结果表明：乌鲁木齐市种植业单产水足迹总量为 19.97 m^3/kg ，其中，单产总蓝水足迹为 12.9 m^3/kg ，占单产水足迹总量的 64.61%，居于主导地位；单产总绿水足迹和总灰水足迹分别为 3.31, 3.76 m^3/kg ，分别占单产水足迹总量的 16.57% 和 18.82%。棉花(8.36 m^3/kg 、油料(3.01 m^3/kg)、豆类(1.73 m^3/kg)、大麦(1.71 m^3/kg)和小麦(1.27 m^3/kg)是单产水足迹较高的作物，单产高蓝水、高绿水、高灰水消耗是其主要特征，5 类作物单位产量总绿、蓝、灰水足迹分别占整个作物单产 3 类水足迹总量的 77.03%，82.02% 和 78.45%，属典型的高耗水作物。同时，水果(0.40 m^3/kg)、薯类(0.35 m^3/kg)、蔬菜(0.14 m^3/kg)和甜菜(0.12 m^3/kg)单产总水足迹较低，4 类作物绿、蓝、灰水足迹之和仅占各类水足迹总量的 4.53%，3.95% 和 5.59%，属低耗水作物。此外，苜蓿(1.22 m^3/kg)、水稻(0.98 m^3/kg)和玉米(0.82 m^3/kg)的水足迹值处于上述两类作物之间，属于中耗水作物。

3.2 规划参数求解

由公式(9—10)计算可得(表 2)，2005—2011 年种植业可用绿水总量和蓝水总量。随后求出绿水、蓝水和水资源总量历年增长率的平均值，并以 2011 年数值为基础，求得 2015 年 3 项指标的规划值。

3.3 优化结果及分析

利用 lingo 9.0 软件对多目标种植结构优化模型进行求解，得到 2015 年 3 种不同情境的种植业发展方案，结果见表 4、表 5。

表 3 乌鲁木齐适宜耕地规模及规划值

种植业耗水/ 10 ⁸ m ³	年降水量/ mm	参考作物 蒸散量/mm	综合植物 系数	适宜耕地 规模/10 ⁴ hm ²	2015 年耕地规模 规划值/10 ⁴ hm ²
4.735	178.2	1031.37	0.685	5.24~6.99	6.96

注:种植业耗水和年降水量均由《2011 年乌鲁木齐市水资源公报》查得,参考作物蒸散量由 CropWat 软件中 ET₀ 模块求得,综合植物系数为 12 种农作物系数的平均值。

表 4 2015 年乌鲁木齐市种植业发展方案多目标规划分类结果

品种	2011 年实际值		压粮增果蔬情境		现代都市农业情境		可持续发展情境	
	播种面积/hm ²	比重/%	播种面积/hm ²	比重/%	播种面积/hm ²	比重/%	播种面积/hm ²	比重/%
小麦	10830	15.57	7099.2	10.20	7099.2	10.20	6546	9.85
水稻	6701	9.63	5985.6	8.60	6960	10.00	3722	5.60
玉米	4420	6.35	1461.6	2.10	1461.6	2.10	2333	3.51
大麦	3249	4.67	2157.6	3.10	3271.2	4.70	2293	3.45
豆类	1150	1.65	765.6	1.10	765.6	1.10	904	1.36
油料	4000	5.75	1809.5	2.60	1809.6	2.60	871	1.31
薯类	6350	9.13	3758.4	5.40	3480	5.00	6646	10.00
蔬菜	25340	36.43	31320	45.00	30484.8	43.80	25922	39.00
棉花	1610	2.31	835.2	1.20	835.2	1.20	565	0.85
苜蓿	2600	3.74	1709.5	2.46	2575.2	3.70	6129	9.22
甜菜	200	0.29	69.6	0.10	487.2	0.70	3988	6.00
水果	3109	4.47	12628.1	18.14	10370.4	14.90	6547	9.85

表 5 2015 年乌鲁木齐市种植业发展方案多目标规划总量结果

项目	2011 年 实际值	压粮增果 蔬情境	现代都市 农业情境	可持续 发展情境
绿水足迹/10 ⁸ m ³	0.68	0.76	0.75	0.71
蓝水足迹/10 ⁸ m ³	2.75	2.33	2.42	2.48
灰水足迹/10 ⁸ m ³	0.88	0.90	0.89	0.86
总收益/10 ⁹ 元	3.86	5.39	5.07	4.29
耕地面积/10 ⁴ hm ²	6.96	6.96	6.96	6.65

以《乌鲁木齐市十二五社会和经济发 展规范纲要》中提出的调减粮食作物播种面积,增加果蔬类作物种植为依据,以充分利用绿水资源、降低蓝水和灰水消耗为约束,同时兼顾经济效益和耕地规模,模拟得到压粮扩果蔬发展情境,结果显示:2015 年种植业耕地规模达到 6.96 万 hm²,与 2011 年持平。耗水方面,2015 年总耗水量为 3.99 亿 m³,比 2011 年降低 7.4%,其中:绿水足迹比 2011 年增加 11.7%,占可用绿水总量的 76.7%,较 2011 年比重增加了 1%;蓝水足迹比 2011 年下降 15.3%,处于可用蓝水容量范围内;灰水足迹和总收益分别较 2011 年增加 2.3%和 39.6%,两项指标均为 3 种方案中的最高值。表明:增加低蓝水消耗和高收益的果蔬类作物种植面积,调减高蓝水消耗和低收益的粮食作物面积,有利于种植业朝低蓝水消耗、高经济收益方向发展,同时绿水利用度较 2011 年有所增加,但农肥施用对水环境影响却在增大。说明此种情境下,种植业发展虽然减小了对蓝水依赖、增加了绿水利用和经济收益,但对周边水环境系统的干扰有所加剧。

以乌鲁木齐市政府提出的发展现代都市农业构想为基础,在压粮扩果蔬的同时保证 6 700 hm² 优质水稻和 3 400 hm² 薯类作物的种植规模,做强区域特色种植产业。此种情境下,种植业发展在不增加耕地面积的基础上总收益较 2011 年增加了 31.3%,增收显著。耗水方面:总水足迹、蓝水足迹分别较 2011 年下降 5.8%和 12%,虽然有一定的节水效果,但由于增加了高耗水作物水稻的播种面积,使得此种情境下的总水足迹和总蓝水消耗量达到 3 种方案中的最高值。同时,绿水足迹占绿水总量比例为 75.7%,与 2011 年比重持平,灰水足迹仍然比 2011 年增加 1.2%。表明此种情境下,种植业发展虽然在凸显区域特色产业的前提下兼顾了节水和增收的要求,但结构调整不利于绿水资源的充分利用,也没有减弱对水环境的污染。

可持续发展情境突出了种植业发展既要服从于干旱区绿洲生态和环境的需求,又要考虑到当地种植业的实际情况。结果显示:此种情境下 2015 年的耕地规模为 6.65 万 hm²,小于 2011 年规模。种植业的总耗水较 2011 年下降 6.3%,绿水足迹占可用绿水总量比重为 71.7%,比 2011 年绿水比重减少 5%;蓝水和灰水足迹分别比 2011 年下降 9.8%和 2.3%,同时,总收益较 2011 年增加 11.1%。这表明:此种发展模式杜绝了压粮增果蔬和现代都市农业情境造成的水环境污染加剧的问题,种植业发展趋向低土地投入、低污染、低绿水利用、高蓝水节余、较高收益的模式。

综合以上分析,考虑到乌鲁木齐种植业未来在绿洲生态系统应发挥的服务功能,确定可持续发展模式为乌鲁木齐市种植业未来优化的基础方案。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 将本文计算所得的水足迹结果与前人研究对比可得,2011 年 Mekonnen 等^[10]采用相同方法所做的有关新疆作物水足迹多数偏高,但大麦和棉花数据偏低,原因可能在于数据来源以及研究区的不同。豆类作物和甜菜是采用旱作模式估算的,蓝水足迹均为 0,这和实际情况有较大差异。与邓晓军等^[30]研究结果相比,他们所估算的棉花水足迹值偏低,这主要是由于估算模型、参数设置以及研究区不同所致。轩俊伟等^[31]采用作物需水量法估算了全疆主要农作物单位面积的绿、蓝水足迹,其结果与本文也有明显差异。作物需水量法主要应用于缺乏土壤数据的情况下,假设土壤水分完全满足作物生长期需水状态的作物耗水估算。而本文在研究土壤水分变化的基础上,采用灌溉制度法估算绿、蓝水足迹。综上所述,水足迹结果受估算模型、参数设置、数据来源、研究区选定等多因素影响,为了能更加准确地反映不同区域作物耗水情况,今后进行相关研究时需要综合考虑上述因素。

(2) 限于数据资料的制约,本次优化中未能考虑虚拟水贸易对乌鲁木齐节水型种植业发展的影响。因此,下一步应结合虚拟水贸易的机会成本来综合研究区域种植结构优化的方向和路径。

4.2 结论

(1) 水足迹计算结果显示:作物蓝水依赖度较高。12 类作物中,棉花、油料、豆类、大麦、小麦属于高耗水作物,苜蓿、水稻、玉米属于中耗水作物,水果、薯类、蔬菜、甜菜属于低耗水作物。

(2) 优化结果得到压粮增果蔬模式、现代都市农业模式以及可持续发展模式 3 种发展方案。与 2011 年相比,压粮增果蔬模式、现代都市农业模式具有低蓝水、高绿水、高灰水、高收益、耕地规模稳定的特点,可持续发展模式在低蓝水、高绿水、高收益的基础上凸现了低灰水、低耕地规模的优势,可作为未来乌鲁木齐市种植业发展的基础方案。

(3) 目前应从以下 4 方面调整种植结构:首先优先考虑调减单位面积、单位产量蓝水消耗较高的棉花、油料、豆类、小麦、水稻等作物的播种面积,这对于降低本地区种植业蓝水消耗将具有重要意义;第二,鼓励和支持农户选择蓝水较少、具有抗旱保产能力且经济效

益高的蔬菜、水果、薯类等节水农作物进行种植;第三,应考虑如何在不影响作物产量的情况下提高农肥利用率,减少施用量,有利于降低作物的灰水足迹。至 2015 年,种植面积宜控制在 6.65 万 hm^2 之内,粮油作物、果蔬作物和其他作物的比例应为 35 : 49 : 16。

参考文献:

- [1] 陈彩苹,丁永建,刘时银.塔里木河上游阿克苏地区水资源与绿洲农业种植结构调整优化研究:以拜城县为例[J].干旱区资源与环境,2007,21(5):29-34.
- [2] 高明杰,罗其友.水资源约束地区种植结构优化研究:以华北地区为例[J].自然资源学报,2008,23(2):204-210.
- [3] 曹雪,阿依吐尔逊·沙木西,金晓斌.水资源约束下的干旱区种植业结构优化分析:以新疆库尔勒市为例[J].资源科学,2011,33(9):1714-1719.
- [4] Dabrowski J M, Masekoameng E, Ashton P J. Analysis of virtual water flows associated with the trade of maize in the SADC region: importance of scale. [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2009,5(5):1967-1977.
- [5] Aldaya M M, Allan J A, Hoekstra A Y. Strategic importance of green water in international crop trade[J]. Ecological Economics, 2010,69(4):887-894.
- [6] Hanasaki N, Inuzuka T, Kanae S, et al. An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2010,384(3/4):232-244.
- [7] Fader M, Gerten D, Thammmer M, et al. Internal and external green-blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2011,8(1):483-527.
- [8] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[R]//Value of the Water Research Report Series. Delft, UNESCO-IHE,2002.
- [9] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations[R]//Value of the Water Research Report Series. Delft, UNESCO-IHE,2004.
- [10] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2011,15(5):1577-1600.
- [11] 张金萍,郭兵托,刘俊阁.基于水足迹的宁夏平原农作物生产用水分析[J].人民黄河,2011,33(5):36-37.
- [12] 李泽红,董锁成,李宇.武威绿洲农业水足迹变化及其驱动机制研究[J].自然资源学报,2013,28(3):410-416.
- [13] 侯庆丰.基于水足迹的甘肃省农作物种植结构优化分析[J].中国沙漠,2013,33(6):1921-1927.
- [14] 李建芳,栗晓玲.基于虚拟水细分的多目标种植结构优化模型[J].灌溉排水学报,2013,32(5):126-129.

- [15] 郭鹏程,包安明,易秋香. 干旱区绿洲—荒漠化演变中的水足迹表征研究:以新疆天山北坡为例[J]. 水土保持通报,2012,32(1):171-176.
- [16] 韩舒,师庆东,于洋. 新疆 1999—2009 年水足迹计算与分析[J]. 干旱区地理,2013,36(2):364-370.
- [17] 李新琪,海热提·涂尔逊. 乌鲁木齐市水资源开发利用现状、问题及对策[J]. 干旱区研究,2001,18(2):11-18.
- [18] 谢香方. 新疆维吾尔自治区经济地理[M]. 北京:新华出版社,1991.
- [19] 乌鲁木齐市统计局. 乌鲁木齐市统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2006—2012.
- [20] 乌鲁木齐市水务局. 乌鲁木齐水资源公报[Z]. 乌鲁木齐,2005—2011.
- [21] 尹林克,南伟疆,严成. 乌鲁木齐城市植被类型及其特点[J]. 干旱区研究,2011,28(6):1011-1019.
- [22] 李诚志. 乌鲁木齐都市圈耕地保护研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2008.
- [23] 谢光洪. 乌鲁木齐河流域土壤有机碳影响因素研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2010.
- [24] Zarate E. WFN grey water footprint working group final report;A joint study developed by WFN partners[R]. Enschede, Netherlands:Water Footprint Network, 2010.
- [25] Aldaya M M, Chapagain A K, Hoekstra A Y, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard[M]. England:Routledge, 2012.
- [26] 虞祎,张晖,胡浩. 基于水足迹理论的中国畜牧业水资源承载力研究[J]. 资源科学,2012,34(3):394-400.
- [27] 盖力强,谢高地,李士美. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究[J]. 资源科学,2010,32(11):2066-2071.
- [28] 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 & Management, 2006,132(3):129-132.
- [29] 王忠静,王海峰,雷志栋. 干旱内陆河区绿洲稳定性分析[J]. 水利学报,2002(5):26-30.
- [30] 邓晓军,谢世友,崔天顺. 南疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究[J]. 水土保持研究,2009,16(2):176-180.
- [31] 轩俊伟,郑江华,刘志辉. 新疆主要农作物生产水足迹计算分析[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(6):195-200.

(上接第 297 页)

- [6] 左乃先,白永平,左京平,等. 城市土地利用效益与城市化耦合协调发展研究:以陕甘宁 27 个城市为例[J]. 水土保持研究,2015,22(6):267-272.
- [7] 刘学,孙泰森. 山西省城市土地集约利用与城市化的耦合协调关系研究[J]. 水土保持研究,2015,22(2):299-304.
- [8] 郭施宏,王富喜. 山东省城市化与城市土地集约利用耦合协调关系研究[J]. 水土保持研究,2012,19(6):163-167.
- [9] 杨海泉,胡毅,王秋香. 2001—2012 年中国三大城市群土地利用效率评价研究[J]. 地理科学,2015,35(9):1095-1100.
- [10] 吴得文,毛汉英,张小雷,等. 中国城市土地利用效率评价[J]. 地理学报,2011,66(8):1111-1121.
- [11] 张荣天,焦华富. 泛长三角城市土地利用效益测度及时空格局演化[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(6):75-81.
- [12] 杨勇,郎永建. 开放条件下内陆地区城镇化对土地利用效率的影响及区位差异[J]. 中国土地科学,2011,25(10):19-26.
- [13] 王丽娜,李世平. 沈阳市城市土地利用效率评价及影响因素分析[J]. 水土保持研究,2014,21(5):311-315.
- [14] 孙宇杰,陈志刚. 江苏省城市土地集约利用与城市化水平协调发展研究[J]. 资源科学,2012,34(5):889-895.
- [15] 孙东琪,张京祥,张明斗,等. 长江三角洲城市化效率与经济发展水平的耦合关系[J]. 地理科学进展,2013,32(7):1060-1071.
- [16] 钱宏胜,岳汉秋,梁亚红,等. 河南省城市土地集约利用与城市化耦合协调性评价[J]. 水土保持研究,2015,22(4):348-353.
- [17] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报,2009,64(4):387-398.
- [18] 范建双,虞晓芬,张利花. 中国区域城镇化综合效率测度及其动力因子分析[J]. 地理科学,2015,35(9):1077-1085.
- [19] 朱天明,杨桂山,苏伟忠,等. 长三角地区城市土地集约利用与经济社会发展协调评价[J]. 资源科学,2009,31(7):1109-1116.
- [20] 张明斗,莫冬燕. 城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析:以东北三省 34 个地级市为例[J]. 资源科学,2014,36(1):8-16.