

DOI: 10.5846/stxb201405231067

李啸虎, 杨德刚, 夏富强. 干旱区城郊种植业水足迹分析与适宜耕地规模测算——以乌鲁木齐市为例. 生态学报, 2015, 35(9): 2860-2869.

Li X H, Yang D G, Xia F Q. Analysis of the water footprint of suburban planting in arid lands and determination of suitable farmland scale: a case study of urumqi. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2860-2869.

干旱区城郊种植业水足迹分析与适宜耕地规模测算 ——以乌鲁木齐市为例

李啸虎^{1,2,3}, 杨德刚^{1,*}, 夏富强¹

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 新疆财经大学旅游学院, 乌鲁木齐 830012

摘要:水足迹方法能够完整、清晰地描述种植业的耗水特征。以干旱区绿洲城市乌鲁木齐市为例,运用水足迹模型分析种植业产品耗水特征,构建水足迹强度系数以探讨种植业耗水对本地水资源的影响度,进而从作物水足迹和水源类型角度建立绿洲耕地规模测度模型测算乌鲁木齐市适宜耕地规模,研究发现:①作物生长期水足迹受土壤水分胁迫和产量损减影响呈现差异化;②2005—2011年间,绿水强度系数波动剧烈,蓝水强度系数均值超出容量极限,作物生长期对蓝水资源依赖性较强,从而进一步加剧了蓝水资源的匮乏;③乌鲁木齐市合理耕地规模约为6万hm²,2005—2011年种植业实际耕地规模均处于超载状态,超载量变化呈现先降后升的特征,现状种植业发展模式对绿洲生态系统扰动不断加剧。

关键词:水足迹;城郊种植业;强度系数;耕地规模;乌鲁木齐市

Analysis of the water footprint of suburban planting in arid lands and determination of suitable farmland scale: a case study of urumqi

LI Xiaohu^{1,2,3}, YANG Degang^{1,*}, XIA Fuqiang¹

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Tourism College, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China

Abstract: Water is the basis for the formation, stability, and development of oasis cities. With the rapid increase in urban population and improvement of economy in arid areas, cropping systems have been developed in the outskirts of oasis cities. This had led to the exploitation of water resources, causing vegetation degradation, soil salinization, and water scarcity for industrial and domestic consumption. Therefore, analyzing the characteristics and influence of water use in cropping systems and determining the suitable farmland scale are urgently required. The water footprint method can be used to completely and clearly describe the characteristics of crop water consumption. Recently, most studies performed using the water footprint method focused on the quantification, influencing factors and implications of water footprints in a region or country. However, research on how the water footprint of crop production affects the water use of natural environment and economic development is scarce. In this study, we selected Urumqi as the typical oasis city in an arid area. We analyzed the water consumption in Urumqi by the water footprint model. Further, a model of water footprint with a water intensity coefficient was developed in order to determine the impacts on local water resources due to crop water use. On the basis of the crop

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金青年项目(2013211B27);中国科学院“西部之光”人才培养计划(RCPY201003)

收稿日期:2014-05-23; 网络出版日期:2014-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dgyang@ms.xjb.ac.cn

water footprint and water resource types available, we generated a model for determining the area that can be allocated for farming purposes in the oasis city. This study revealed the following findings: (1) soil water stress and yield loss reduction showed differential responses during the crop growth period. Vegetables, corn, and pulses can adapt to water shortage and drought conditions and retain their production capacity. Blue water consumption per area per yield for cotton was higher, whereas that for vegetables was lower. Fruits needed a higher proportion of green water per area per yield, and vegetables, wheat, rice, and potato formed the largest group in the annual water footprint. (2) Between 2005 and 2011, the green water intensity coefficient fluctuated remarkably, and the average volume of blue water exceeded its capacity limits. The crops depended more on blue water resources during the growing period; therefore, blue water resources were remarkably affected. (3) In Urumqi, farmland occupies about 9×10^5 mu; the actual area occupied by farmland was in an excess from 2005 to 2011, and the situation is speculated to worsen over the coming years. The model of planting development has disturbed the oasis ecosystem. Our findings suggest that ecosystem health needs to be improved and a socioeconomic system needs to be developed in the oasis city.

Key Words: water footprint; suburb planting; intensity coefficient; farmland scale; Urumqi

水是绿洲城市形成、稳定和发展的基础要素。随着干旱区城市人口规模的持续扩大和经济活动的日益增强,水资源供需矛盾不断加剧。城郊种植业发展在占用大量水资源的同时造成植被退化、土壤盐渍化、工业与生活供水不足等一系列问题,严重制约了区域社会经济的发展。因此,分析种植业产品耗水特征并以此为基础测算适宜耕地规模对于维护绿洲城市自然生态系统的稳定和社会经济系统的发展具有重要意义。

以往对种植业水资源利用的研究仅从农田灌溉直接耗水角度进行测算,而 Hoekstra 等学者在借鉴生态足迹^[1-2]及虚拟水理论^[3]基础上,提出用水足迹方法分析作物生长期耗水量。其中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。2002 年以来,国外学者围绕农作物水足迹问题从理论和实践两个方面展开大量研究,形成了较为丰富的研究成果。在理论层面, Hoekstra^[4-5]借鉴生命周期理论构建了估算作物生长期绿、蓝水足迹总量的农作物虚拟水量化模型, Chapagain^[6]在前人研究基础上进一步提出了作物生长期绿、蓝水足迹各自的量化模型,并首次提出了灰水足迹的概念, Zarate^[7]进一步完善了灰水足迹的概念并提出了测度方法。 Mekonnen^[8]在考虑了不同自然环境及耕作模式对作物生长期耗水影响的基础上,提出了用灌溉制度法来估算作物绿、蓝水足迹,进一步完善了农作物水足迹测算方法。同时, Hoekstra^[9]等学者还初步构建了可持续性水足迹评价体系,从定性的角度探讨区域水足迹对周边生态环境及社会经济系统的影响。实践中, Chapagain^[6,10]分别研究了全球棉花、大米的水足迹,得出:单种作物全球年均总耗水中,棉花(42%)蓝水足迹比重相对较高,而大米(48%)绿水足迹比重相对较高。 Mekonnen^[8]测算了小麦全球年均总耗水,得出:小麦水足迹中绿水足迹比重达 70%,居主导地位。同时,两位学者还发现:作物灰水比重均较低;不同区域内作物绿、蓝水足迹比重各不相同,气候、品种、播种面积是其主要影响因素。 Dabrowski^[11]、Aldaya^[12]、Hanasaki^[13]分别对主要进出口国玉米、豆类等作物的水足迹进行了研究,分析这些国家的粮食进出口对本国水资源节耗的影响。 Fader^[14]测算了全球 11 种主要农产品的水足迹,得出:需要将虚拟水和虚拟土地结合在一起研究种植业水土资源的节约问题。 Hoekstra 研究团队^[4,15-16]还先后 3 次对全球不同国家间主要初级农产品及其衍生产品的水足迹进行了量化分析,探讨了全球种植业水足迹与粮食安全的关系及实施虚拟水战略对国家水资源节约的重要意义。国内相关研究起步较晚^[17],研究对象主要集中在对特定区域的小麦、玉米、棉花等单种农作物产品生长期水足迹的量化分析^[18-21],也有学者^[22-23]对干旱区种植业产品的水足迹特征进行了整体评价,但在作物水足迹测算中忽略了干旱区气候、水分、土壤及灌溉模式对作物生长期耗水的影响,因而,无法全面反映作物的实际耗水特点。综上所述,国外种植业水足迹研究目前主要集中在对作物水足迹量化方法研究、作物水足迹影响因素分析、水足迹响应机制的

构建等问题上,鲜有研究种植业水足迹对周边生态、环境及社会经济耗水的影响。国内研究尚处于起步阶段,缺乏对水资源匮乏的干旱区绿洲种植业水足迹进行全面定量研究及影响评价。

作为我国最大的干旱区绿洲城市——乌鲁木齐市^[24],水资源利用主要以农田灌溉为主,农业耗水占生产性耗水的 77%,其中,种植业约占为 82%。高耗水的种植业发展模式造成本地区水资源短缺日益加剧,不仅威胁着周边生态系统的正常运行而且也严重制约了当地社会经济地发展。因而,本文运用水足迹模型深入研究乌鲁木齐市种植业水足迹特征,评价种植业水足迹对本地水资源的影响度,并以此为基础测算绿洲适宜耕地规模,期为干旱区域郊种植业可持续发展提供理论参考和科学依据。

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°54'16"—44°58'16" N,86°46'10"—88°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 800m,总面积 1.38×10⁴km²。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℃,降水量仅 280 mm,而蒸发量却达 2730 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 m³,偏丰年可达 14.94 亿 m³,偏枯年亦有 8.56 亿 m³,其中地表水资源平均为 10.50 亿 m³,地下水资源平均为 6.14 亿 m³。

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域郊型种植业,种植模式以蔬菜、小麦、水稻、薯类作物为主,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,并严重阻碍了工业和城市化进程的发展。

2 研究方法数据来源

2.1 种植业绿、蓝水足迹

根据生态水文学研究成果^[25],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。种植业产品绿、蓝水足迹量化首先需要模拟生长期实际蒸散发量(ET_a),进而按水源类型折算绿、蓝水足迹。由联合国粮农组织(FAO)发布的 CropWat 模型具有所需参数较少,计算简便且与实际值拟合较好等特点,因而被广泛使用。在对 ET_a 的模拟方法上,CropWat 推荐了作物需水量法和灌溉制度法两种方法,前者是模拟农作物在不受土壤水分胁迫情形下生长期的生理耗水量 ET_c ,并将 ET_c 视为 ET_a ,后者则引入了土壤水分胁迫因子(K_s),探讨在不同灌溉方式下受到土壤水分影响的 ET_a 及由此导致的产量损减率。从中不难发现,作物需水量法适用于土壤水分完全满足作物生长期需水的理想状态下 ET_a 的估算,而考虑了土壤水分不足及灌溉方式不同对作物 ET_a 影响的灌溉制度法更适合运用于不同区域种植业实际产品 ET_a 的模拟。根据乌鲁木齐市气候、土壤特点,在考虑当地种植业生产类型为灌溉农业的基础上,本文采用 CropWat 中的灌溉制度法来模拟主要农产品的 ET_a ,进而估算蓝、绿水足迹(图 1)。

2.2 种植业灰水足迹

种植业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量^[7]。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》^[9]当中有关农作物生长期灰水足迹方法计算:

$$WF_{greyi} = \frac{(a \times AR) / (c_{max} - c_{net})}{Y_i} \quad (1)$$

式中, a 表示淋溶率, AR 表示农作物生长期肥料使用量, c_{max} 表示自然水体可容纳的最大污染浓度, c_{net} 表示自然水体本底浓度。

2.3 种植业水足迹强度系数

种植业水足迹强度表征其水足迹各要素(绿、蓝、灰水足迹)对周围自然、经济及生态系统中可利用水资

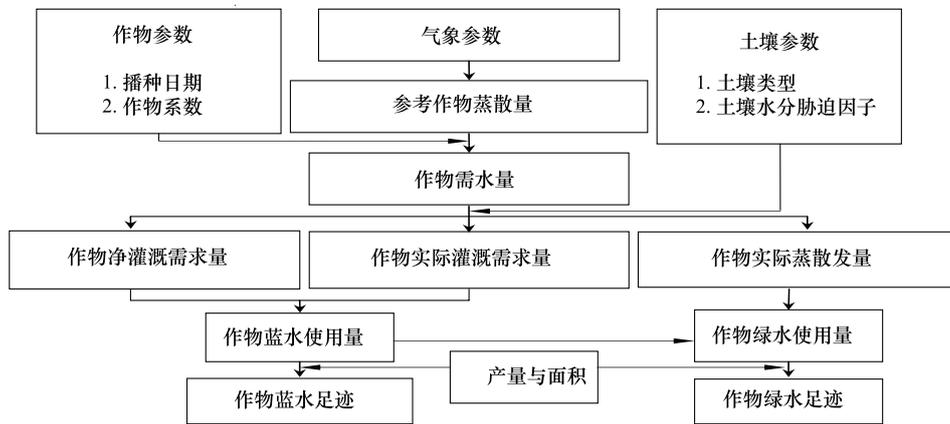


图 1 Cowpat 8.0 灌溉制度法模拟作物蓝、绿水足迹流程图

Fig.1 The flow chart of imitating the crop green and blue water footprint By Irrigation method in Cowpat8.0

源的占有程度,强度越高说明种植业耗水模式越粗放,可持续性越低。这里引入“种植业水足迹强度系数”指标来直观反映作用强度,根据水源类型具体分解为:绿水强度系数(WFI_{green})、蓝水强度系数(WFI_{blue})和灰水强度系数(WFI_{grey}),分别代表种植业水资源消耗对自然环境的蒸散发耗水、灌溉耗水以及自然水体纳污的影响度,其中:绿水强度系数和灰水强度系数临界值设为 1,如果大于 1,表明某种类型的水消耗量已超出其自然和生态容量极限,没有继续利用的潜力,蓝水强度系数根据发达国家农业用水比重设定临界值为 0.4^[26],大于 0.4 即表明当地农业灌溉耗水对社会经济发展起到阻碍作用,种植业挤占了过多的水资源。根据“木桶原理”,本文界定,如果有一项系数均值大于临界值,即表明种植业用水模式不可持续,需要调整种植结构:

$$WFI_{green} = \frac{WF_{green}}{W_{green}}, \text{其中, } W_{green} = (P_c - W_c) \times \mu, \mu = \frac{CA}{TA} \quad (2)$$

$$WFI_{blue} = \frac{WF_{blue}}{W_c - EWD} \quad (3)$$

$$WFI_{grey} = \frac{WF_{grey}}{W_c} \quad (4)$$

式中, W_{green} 表示可利用的绿水总量(m^3/a), P_c 表示总降水量(m^3/a), W_c 表示水资源总量(m^3/a), w_i 表示耕地面积比重, CA 表示耕地面积, TA 表示土地总面积, EWD 表示生态环境需水量(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^[27]。

2.4 干旱区绿洲合理耕地规模测度

水资源是绿洲形成的决定因素,而一定数量的耕地面积又是绿洲稳定和发展的基础。国内外学者已就相关问题做了大量研究,基本形成了以实现区域生态安全为原则的两类评价体系,其中,第一种方法主要从维护区域生态稳定和平衡角度出发,根据绿洲水热平衡、水土平衡特征估算耕地的合理阈值^[28-29],而第二种则是在综合理解绿洲景观格局、功能和生态过程相互作用的基础上,以数理分析和空间信息技术为支撑,调整优化包括耕地在内的各种景观类型在空间上和数量上的分布格局^[30-36]。两类方法虽然都将水资源作为评价绿洲合理耕地面积的基础要素,但他们都缺乏对水源类型的进一步区分,由于不同作物生长期消耗的绿、蓝水资源存在差异,那么不同类型水源总量所能承载的耕地规模势必不同。有鉴于此,本文从水足迹的角度出发,进一步将水源细化为绿水和蓝水,引入绿水和蓝水适宜耕地规模两项指标,它们分别代表在一定环境绿水和蓝水容量下,满足不会对周边生态环境和社会经济系统耗水产生负面影响前提下的种植业合理耕地规模:

$$A_{c1} = \frac{WF_{green}}{\sum_{i=1}^n CWU_{greeni} \times w_i} \quad (5)$$

$$A_{c2} = \frac{WF_{blue}}{\sum_{i=1}^n CWU_{bluei} \times w_i} \quad (6)$$

式中, A_{c1} 代表绿水适宜耕地规模, A_{c2} 代表蓝水适宜耕地规模, CWU_{greeni} 代表 i 种作物单位面积的绿水消耗量, CWU_{bluei} 代表 i 种作物单位面积的蓝水消耗量, w_i 为权重系数。

2.5 数据来源

本文选取小麦、水稻等 12 种乌鲁木齐市种植业主要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 数据库中有乌鲁木齐的气候数据; 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), 其中大麦数据由乌鲁木齐市农牧局农牧处提供; 水资源和降水总量来自《乌鲁木齐市水资源公报》(2005—2011), 土壤数据通过乌鲁木齐县农业技术推广站调研结果获得。此数据表明, 乌鲁木齐土质为壤土, 查阅 FAO56 土壤含水量表, 界定研究区土壤水分相关资料为, 100 cm 土层平均土壤容重为 1.43 g/cm³, 田间持水量(按体积计)25.0%, 凋萎系数为 7.2。

3 结果与分析

3.1 种植业产品绿、蓝水足迹

将 CLIMWAT 数据库中乌鲁木齐市气候数据导入 CROPWAT8.0 中参考作物蒸散量估算模块, 得到研究区参考作物蒸散量 ET_0 , 随后将 ET_0 、作物系数及土壤含水量参数输入作物实际蒸散量模拟模块, 得到不同作物生长期土壤水分胁迫因子、蓝、绿水蒸散量和产量损减系数(表 1)。

表 1 Cropwat 模拟乌鲁木齐作物生长期参数值

Table 1 Crop parameter value of growing period by Cropwat imitation in Urumqi

作物 Crops	土壤水分胁迫 因子(K_s) Factor of soil moisture stress	作物实际蒸散量 ET_a (mm/hm ²) Crop actual evapotranspiration			产量损减系数(YR)/% Coefficient of yield reduction
		绿水使用量 Crop green water use	蓝水使用量 Crop blue water use	合计 Total	
		小麦 Wheat	0.62	165.5	
水稻 Rice	1	103.2	593.9	697.1	0
玉米 Maize	0.26	104.1	468.2	572.3	42.8
大麦 Barley	0.79	106.5	384	490.5	18.7
豆类 Pulse	0.29	92.4	415.4	507.8	22.4
油料 Oil	0.56	102.5	482.5	585	24.3
薯类 Tuber	0.15	102.5	544.7	647.2	65.2
蔬菜 Vegetable	0.13	84.8	390.9	475.7	48.3
棉花 Cotton	0.57	156.5	686	842.5	30.6
苜蓿 Purple	0.69	233.7	301.5	535.2	11.3
甜菜 Beet	0.16	128.1	638.4	766.5	52.6
水果 Fruit	1	236.1	489	725	0

小麦数据为冬小麦和春小麦模拟结果的平均值

由表 1 可见, 水稻、水果无土壤水分胁迫和产量损减, 表明种植期土壤实际有效水分满足了作物对土壤水分的需要, 作物生长处于理想状态, 因而实际产量为作物最大产量。小麦、苜蓿和大麦 K_s 值处于 0.62 到 0.69 之间, 受到土壤水分的轻度胁迫, 产量损减系数处于 11.3% 到 21.9% 之间, 表明弱土壤水分胁迫对这些作物产量影响较小。油料和棉花作物 K_s 值在 0.56 到 0.57 之间, 属于中度土壤水分胁迫, 对其产量有较显著影响, 尤其是棉花作物, YR 为 30.6%, 表明其生长期耗水可变弹性较小, 产量受土壤水分供给约束较大。蔬菜(0.13)、薯类(0.15)、甜菜(0.16)、玉米(0.26)和豆类(0.29)受土壤水分胁迫较强, 表明 5 种作物生长期吸收土壤有效

水分较少,由产量损减系数可见,5种的作物从大到小依次为薯类(65.2%)、甜菜(52.6%)、蔬菜(48.3%)、玉米(42.8%)和豆类(22.4%),可得在较强土壤水分胁迫下,薯类与甜菜产量损减量最大,作物生长对土壤水分刚性需求最强,虽然蔬菜和玉米产量损减率也近50%,但是在受较强土壤水胁迫的作物中,其产量受影响程度却低于薯类和甜菜,表明蔬菜和玉米具有一定的缺水适应性和耐旱保产能力,而豆类作物 YR 值在强胁迫作物中最小,表明其缺水适应性和抗旱保产能力较强。

由单位面积作物 ET_c 模拟结果可得,棉花、甜菜是单位面积蓝水消耗量较高作物,这主要与研究区气候条件、土壤、用水效率、农业灌溉制度及管理等因素有关。水果、苜蓿单位面积绿水消耗最高,蓝水消耗相对较低,这可能是由于两类作物生长周期较长(约为1a),直接利用自然降水的机率较大造成的结果,蔬菜、大麦受作物自身的生理耗水特点影响,绿、蓝总耗水量最低。

进一步由2005—2011年乌鲁木齐主要农作物耕地面积和产量资料计算得出乌鲁木齐主要农作物连续年份绿、蓝水足迹值及其均值(图2,图3)。

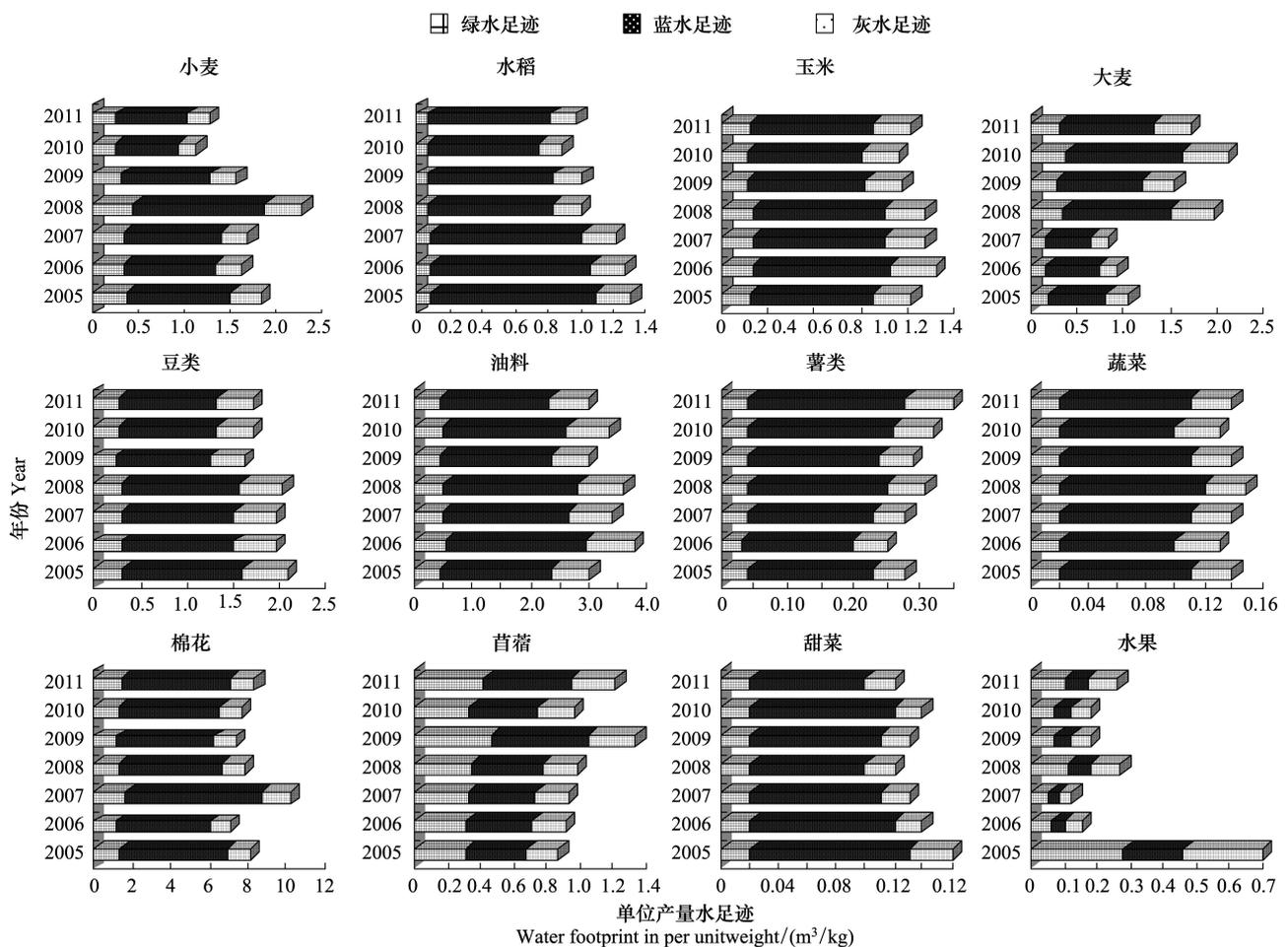


图2 2005—2011年乌鲁木齐市种植业产品单位产量水足迹

Fig.2 Water footprint of crop production in per unit weight from 2005 to 2011 in Urumqi

由图3可见,棉花($5.58 \text{ m}^3/\text{kg}$)、油料($2.12 \text{ m}^3/\text{kg}$)单位产量蓝水足迹占整个作物单位产量蓝水足迹总量的59%,属单产高蓝水消耗作物。水稻、大麦、小麦和豆类作物单位面积蓝水足迹在 $0.84\text{—}1.18 \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,属单产中蓝水消耗作物,而蔬菜、甜菜、水果、薯类、苜蓿和玉米单位产量蓝水足迹均小于 $0.6 \text{ m}^3/\text{kg}$,属单产低蓝水消耗作物,除了自然环境和自身耗水特点外,这可能还与作物单位面积产量有关。苜蓿、水果的单产绿水比重最高,分别为44%和32%,结合其单产低蓝水消耗特点分析可得,作物在充分利用自然降水的同时节约了蓝水消耗。由图3可见,蔬菜、小麦、水稻和薯类是年度蓝水足迹最大的四类作物,占整个种植业年度

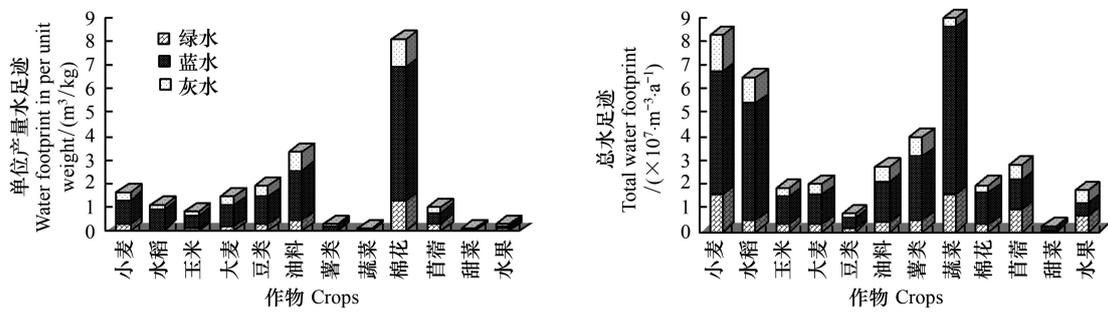


图3 2005—2011年乌鲁木齐市种植业产品单位产量和年度总水足迹平均值

Fig.3 Average water footprint of each product in per unit weight and year from 2005 to 2011 in Urumqi

总蓝水足迹的72%,是乌鲁木齐市种植业年蓝水消耗的主要部分。四类作物的年均播种面积和总产量比重分别为70%和86.1%(图4,图5),居于主导地位,结合其单位面积和单产蓝水消耗特点可见,单位面积和单位产量耗水特点是影响乌鲁木齐市种植业总蓝水消耗的基础因素,而播种面积和总产量则是其决定性因素。

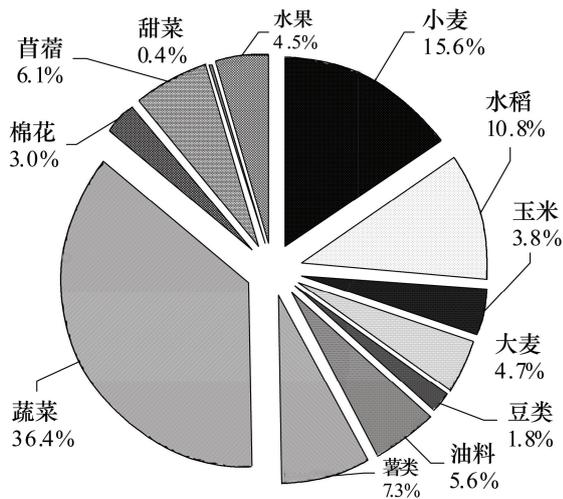


图4 乌鲁木齐市作物播种面积比重

Fig.4 Proportion of crops sown area in Urumqi

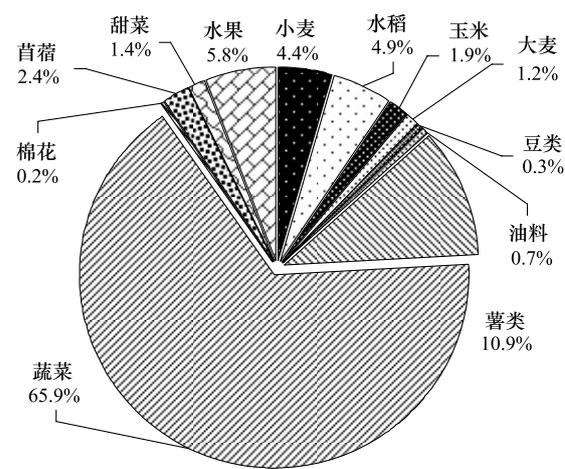


图5 乌鲁木齐市作物产量比重

Fig.5 Proportion of crops yield in Urumqi

3.2 种植业产品灰水足迹

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^[37],因而,本文以稀释氮元素的耗水量为代表评价种植业的灰水足迹。通过对研究区农作区的实际调查,氮肥亩均施用量为15kg,根据文献^[9],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10mg/L,采用公式(1)计算得出2005—2011年乌鲁木齐市主要农作物单位产量和年度总灰水足迹及均值(图2,图3)。从单产灰水足迹结果可见,棉花(1.22 m³/kg)、油料(0.74 m³/kg)灰水足迹最高,甜菜(0.02 m³/kg)、蔬菜(0.03 m³/kg)、水果(0.09 m³/kg)单产灰水足迹值最低,蔬菜(2.39×10⁷ m³/a)、小麦(1.47×10⁷ m³/a)、水稻(1.08×10⁷ m³/a)和薯类(0.74×10⁷ m³/a)是年度灰水值最高的四类作物,和作物绿、蓝水足迹相同,单位面积产量是影响单产灰水足迹大小的主导因素,播种面积和总产量是决定年度灰水足迹的核心。

虽然本次估算忽略了其他农肥施用和农药使用对水质污染的影响,但乌鲁木齐市种植业整体单产和年度灰水足迹总量分别达到3.79 m³/kg和8.84×10⁷ m³/a,占水足迹总量比为20%和19%,均高于绿水比重,可以看出灰水足迹在蓝、绿、灰水3种水足迹组成中占有很大的比例,具有很重要的地位。相关研究表明,和国外相比,我国过量施肥现象极其普遍,氮肥利用率整体水平较低^[19,38],因而,提高氮肥利用率、降低其损失率是减少其灰水足迹的重要手段。

3.3 乌鲁木齐市种植业水足迹强度

为了进一步探讨乌鲁木齐市种植业水足迹对周边生态环境及社会经济系统耗水的影响,将 2005—2011 年度绿、蓝、灰水足迹数据及表 2 中水资源与土地资源数据代入公式 2—4,得到 2005—2011 年乌鲁木齐市种植业各水足迹要素强度系数值(图 6),2005—2011 年间,乌鲁木齐市种植业绿水强度系数在 0.43—1.31 间波动,均值为 0.95,变化幅度较大但总体尚未超出容量极限。鉴于 7 年间乌鲁木齐市种植结构比较固定,因而,绿水系数波动主要体现为环境绿水总量变化幅度较大,由于降水是乌鲁木齐市水汽的主要来源,考虑到研究区年际蒸发量在短时间内不可能会有大幅度变动,因而其环境绿水总量主要取决于年降水量和播种面积,2007 年乌鲁木齐市降水量达到 7 年间的最大值,但同期播种面积仅为 6.187 万 hm^2 ,为 7 年最低值,因而,绿水强度系数最低,2008、2009 两年正好相反,在播种面积大幅度增加的情况下,降水量却仅为 2007 年的 61%,导致绿水系数均大于 1,表明环境绿水无法满足作物生长期绿水需求,超出部分只能通过蓝水资源弥补。蓝水强度系数均值为 0.54 且 7 年间在 0.42—0.63 之间波动,均已超出农业灌溉耗水的最大范围,表明,种植业发展挤占了过多工业、服务业和居民生活用水,用水模式粗放,用水效率较低。灰水强度系数均值为 0.08,且 7 年间在 0.06 到 0.1 之间波动,波动幅度较小,系数较小,表明,农肥施用对自然水体的影响不大,处于水环境自身纳污能力之内。综合分析可得,乌鲁木齐市种植业产品生长期耗水结构中,作物对蓝水资源的依赖大于绿水,当作物绿水消耗大于环境绿水容量时,只有通过占用更多的蓝水来满足自身的耗水需求,造成种植业产品高蓝水消耗的特征,从而,进一步加剧本地蓝水资源的短缺。

表 2 2005—2011 年乌鲁木齐市水资源量与耕地规模

Table 2 Water resource and farmland size in Urumqi from 2005 to 2011

指标 Indexes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
降水总量 Precipitation totals/ (10^9m^3)	2.755	2.333	3.820	2.269	2.391	2.140	2.533
水资源总量 Total water resources/ (10^9m^3)	1.052	0.856	1.185	0.999	1.178	0.939	0.936
土地总面积 Total area/ (10^7hm^2)	0.109	0.109	0.109	0.142	0.142	0.138	0.138
耕地面积 Farmland/ (10^6hm^2)	0.067	0.062	0.062	0.067	0.069	0.068	0.070

3.4 干旱区绿洲合理耕地规模

将 2005—2011 年作物绿、蓝总水足迹数据及表 1 数据代入式 5—6 中,其中, w_i 设定为 i 种作物绿、蓝水消耗占有所有作物绿、蓝水消耗的比重,计算得到图 7,2005—2011 年间,乌鲁木齐市绿水可容纳耕地规模范围在 5.12 万 hm^2 至 6.435 万 hm^2 之间,蓝水可容纳耕地规模范围在 5.581 万 hm^2 至 6.60 万 hm^2 之间,而同期实际耕地规模却在 6.187 万 hm^2 至 6.955 万 hm^2 之间,实际耕地规模处于超载状态。将多年绿水、蓝水可容纳耕地规模加权平均得到乌鲁木齐市合理耕地规模约为

6 万 hm^2 左右,并与实际耕地规模求差得到 2005—2011 年实际耕地规模超载变动趋势图(图 8)。可见,乌鲁木齐市种植业耕地规模超载变化呈现先下降后上升的特征,其中:2011 年耕地超载量达到最大值 0.956 万 hm^2 ,结合水足迹强度系数分析结果,表明:乌鲁木齐市种植业现状发展模式对绿洲生态系统扰动不断加大,生态系统向不可持续方向发展。

4 结论与讨论

水足迹研究已成为当前水资源供需均衡分析的重要工具,为了直观反映作物水足迹对区域水资源的影响,本文构建了由绿水、蓝水和灰水足迹组成的种植业水足迹强度系数,较为有效地分析了研究区种植业耗水

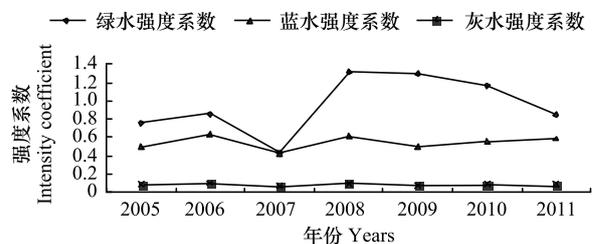


图 6 2005—2011 年乌鲁木齐市种植业水足迹强度系数波动
Fig. 6 Intensity coefficient waving of crop production WF in Urumqi from 2005 to 2011

对周边自然生态系统和社会经济系统水资源的影响程度;论文还从作物水足迹视角构建了基于绿水和蓝水的适宜耕地规模测算模型,为解释不同类型水源所能承载的合理耕地阈值提供了理论依据。

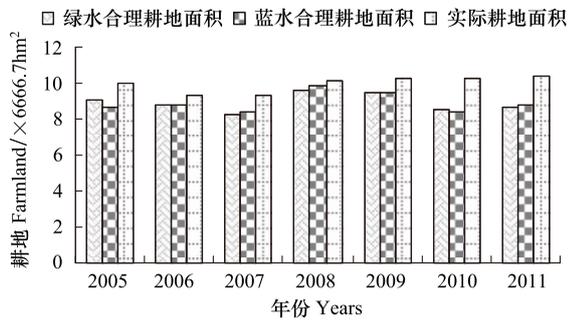


图7 2005—2011年乌鲁木齐市绿、蓝水适宜耕地规模与实际耕地规模对比

Fig.7 Comparison between green and blue water from 2005 to 2011

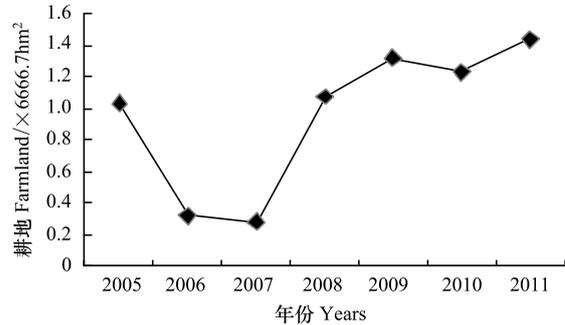


图8 2005—2011年乌鲁木齐市耕地超载量变动

Fig.8 Overload capacity change of farmland appropriate farmland and actual farmland in Urumqi in Urumqi from 2005 to 2011

通过对研究区种植业产品耗水特征分析、水足迹强度系数及适宜耕地规模测算,本文得出以下结论:第一,乌鲁木齐市种植业产品生长期受土壤水分胁迫和产量损减呈现差异化,蔬菜、玉米、豆类作物具有缺水适应性和抗旱保产能力;棉花单位面积和单位产量蓝水消耗量较高,蔬菜单位面积和单位产量蓝水消耗较低,气候、土壤、灌溉制度及单位面积产量使其主要影响因子,水果受自身生理特点影响单位面积和单位产量绿水比重较高;蔬菜、小麦、水稻和薯类是年度水足迹最大的四类作物,播种面积和总产量是其决定性因素。第二,种植业水足迹强度系数研究表明:绿水强度系数均值为0.95,波动幅度较大,2008—2009年超出环境绿水容量极限,只有通过蓝水资源满足自身耗水需求,2005—2011年间蓝水强度系数均值为0.54,已超出了种植业灌溉耗水极限,灰水强度系数较低,未对周围水体造成环境影响,综合而言,乌鲁木齐市种植业产品生长期对蓝水资源的依赖大于绿水,种植业发展进一步加剧了蓝水资源的短缺。第三,基于作物水足迹容量的乌鲁木齐市合理耕地规模约为6万 hm^2 左右,2005—2011年种植业实际耕地规模均处于超载状态,超载量变化呈现先降后升的特征,现状种植业发展模式对绿洲生态系统扰动不断加大,生态系统向不可持续方向发展。

当然,本文提出的水足迹强度及合理耕地规模分析方法也存在需要进一步完善与深入研究的地方。例如,在水足迹强度模型中,对绿、蓝水总量的估算重点关注了当年的流量,对前期绿、蓝水储量及当年储量的变量考虑不够,影响了绿、蓝水足迹强度系数的测算精度。又如,蓝水足迹强度系数只能从总体上反映种植业发展对蓝水资源的占用程度,限于数据的制约,还没有进一步区分作物耗水对地表和地下水资源各自的占有度。因此,今后可以考虑结合水文模型法、生物与水文耦合法估算绿、蓝水储量、流量与变量,为精确估算可利用绿、蓝水总量提供支撑,同时,在保障数据获取性和准确性的前提下,测算地表、地下蓝水足迹强度系数,以提高模型的测算精度和深度。此外,文中合理耕地规模模型侧重于从作物生理耗水特征及水源类型角度测度研究区适宜耕地总量,尚未结合区域内水资源分布和耕地分布特性测算出不同具体种植区的适宜耕地规模,一定程度上影响了模型结果的实际指导价值。因此,未来如何将这要素结合起来,并在模型中实现,以提高模型的综合评价能力是下一步应该重点思考的问题。

参考文献 (References):

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] Rees W E, Wackernagel M. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Philadelphia: New Society Publishers, 1996: 160-170.
- [3] Allan T. 'Virtual water': A long term solution for water short middle eastern economies? // Paper Presented at the 1997 British Association

- Festival of Science. Leeds; University of Leeds Press, 1997: 24-29.
- [4] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade; Value of Water Research Report Series (No. 11). Delft: UNESCO-IHE, 2002.
- [5] Hoekstra A Y. Virtual Water Trade; Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series (No. 12). Delft: UNESCO-IHE, 2003.
- [6] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, Gautam R. The Water Footprint of Cotton Consumption; Value of Water Research Report Series (No. 18). Delft: UNESCO-IHE, 2005.
- [7] Zarate, E. 'WFn grey water footprint working group final report: A joint study developed by WFn partners', Water Footprint Network, Enschede, Netherlands, 2010.
- [8] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14 (7): 1259-1276.
- [9] Hoekstra A, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London: Earthscan, 2011: 76-97.
- [10] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [11] 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. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(10): 1967-1977.
- [12] Aldaya M M, Allan J A, Hoekstra A Y. Strategic importance of green water in international crop trade. *Ecological Economics*, 2010, 69(4): 887-894.
- [13] Hanasaki N, Inuzuka T, Kanae S, Oki T. An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3/4): 232-244.
- [14] Fader M, Gerten D, Thammer M, Heinke J, Lotze-Campen H, Lucht W, Cramer W. Internal and external green-blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1641-1660.
- [15] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water Footprints of Nations; Value of Water Research Report Series (No. 16). Delft: UNESCO-IHE, 2004.
- [16] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [17] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5458-5466.
- [18] 邓晓军, 谢世友, 崔天顺, 李艺, 李晖. 新疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 176-180, 185-185.
- [19] 盖力强, 谢高地, 李士美, 张彩霞, 陈龙. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究. *资源科学*, 2010, 32(11): 2066-2071.
- [20] 何浩, 黄晶, 淮贺举, 童文杰. 湖南省水稻水足迹计算及其变化特征分析. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 294-298.
- [21] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响. *生态学报*, 2012, 32(23): 7375-7382.
- [22] 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. *人民黄河*, 2011, 33(5): 36-38.
- [23] 李泽红, 董锁成. 武威绿洲农业开发对民勤绿洲来水量的影响——基于水足迹的视角. *资源科学*, 2011, 33(1): 86-91.
- [24] 张仲伍, 杨德刚, 张小雷, 陈红娟, 张月芹. 绿洲城市综合规模与水资源相互作用关系研究——以乌鲁木齐市为例. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 536-542.
- [25] Falkenmark M. Land-water linkages: A synopsis // Land and water integration and river basin management; Land and Water Bulletin. Rome: FAO, 1995.
- [26] 李绍飞. 改进的模糊物元模型在灌区农业用水效率评价中的应用. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(11): 175-181.
- [27] “生态环境建设”课题组. 西北地区生态环境建设区域配置及生态环境需水量研究. *中国水利*, 2003, (5): 36-39.
- [28] 王忠静, 王海峰, 雷志栋. 干旱内陆河区绿洲稳定性分析. *水利学报*, 2002, (5): 26-30.
- [29] 刘金鹏, 费良军, 南忠仁, 尹亚坤. 基于生态安全的干旱区绿洲生态需水研究. *水利学报*, 2010, 41(2): 226-232.
- [30] Collins M G, Steiner F R, Rushman M J. Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements. *Environmental Management*, 2001, 28(5): 611-621.
- [31] Rodriguez-Gallego L, Achkar M, Conde D. Land suitability assessment in the catchment area of four Southwestern Atlantic coastal lagoons: Multicriteria and optimization modeling. *Environmental Management*, 2012, 50(1): 140-152.
- [32] Odeh I O A, Tan D K Y, Ancev T. Potential suitability and viability of selected biodiesel crops in Australian marginal agricultural lands under current and future climates. *Bioenergy Research*, 2011, 4(3): 165-179.
- [33] Bagherzadeh A, Daneshvar M R M. Qualitative land suitability evaluation for wheat and barley crops in Khorasan-Razavi Province, Northeast of Iran. *Agricultural Research*, 2014, 3(2): 155-164.
- [34] Nidumolu U B, van Keulen H, Lubbers M, Mapfumo A. Combining interactive multiple goal linear programming with an inter-stakeholder communication matrix to generate land use options. *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22(1): 73-83.
- [35] Santé-Riveira I, Crecente-Maseda R, Miranda-Barrós D. GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 63(2): 257-273.
- [36] 蒙吉军, 朱利凯, 杨倩, 毛熙彦. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. *生态学报*, 2012, 32(21): 6755-6766.
- [37] 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. *资源科学*, 2012, 34(3): 394-400.
- [38] Stevens W B, Hoefl R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: II. Nitrogen uptake efficiency. *Agronomy Journal*, 2005, 97(1): 1046-1053.