基于作物需水量的城市农业水资源评估
——以贵州省贵阳市为例

李 亮[1,2], 马良瑞[3], 熊康宁[1]

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州财经大学 管科学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: [目的] 对贵阳市城市农业绿水和蓝水的水足迹与灌溉效率进行定量研究,为科学定量评估城市农业用水和管理监测提供依据。[方法] 利用实地调查数据、贵阳市气象数据与农业统计数据,基于作物需水量、水足迹的方法进行农业水资源评估。[结果] ①作物水足迹极值取决于调查样地作物单位面积产量的极值。②贵阳市城市农业不同作物生长的消耗绿水量均高于蓝水量,绿水量和蓝水量的比例范围从最低 53.81%(豇豆)到最高 63.60%(番茄)。③贵阳市城市农业 3 种灌溉效率(沟灌、喷灌和滴灌)分别为 27.23%,69.45%与80.32%。④2017 年贵阳市城市农业蓝色水量灌溉需求量在 4.81×10^5 m^3(完全滴灌)与 6.93×10^5 m^3(完全沟灌)之间。[结论] 2017 年贵阳市城市农业总用水需求为 1.29×10^6 m^3,其中 8.84×10^5 m^3为绿水,4.02×10^5 m^3 为蓝水。灌溉方式对贵阳市城市农业用水有较大的提升空间,滴灌方式对贵阳市城市农业水资源管理贡献率达 53.09%。

关键词: 城市农业; 作物需水量; 水足迹; 绿水; 蓝水; 灌溉效率; 贵阳市

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)04-0300-06 **中图分类号**: TV213, F323.213

文献参数: 李亮, 马良瑞, 熊康宁. 基于作物需水量的城市农业水资源评估[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 300-305. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.047; Li Liang, Maliang Rui, Xiong Kangning. Evaluation of agricultural water resources in urban area based on crop water demand[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 300-305.

Evaluation of Agricultural Water Resources in Urban Area Based on Crop Water Demand
—A Case Study in Guiyang City in Guizhou Proivince

Li Liang[1,2], Maliang Rui[3], Xiong Kangning[1]

(1. *School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*; 2. *School of Management Science, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*; 3. *School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*)

Abstract: [Objective] This paper conducted a quantitative study on the water footprint and irrigation efficiency of green water and blue water in urban agriculture in guiyang city, so as to provide a basis for scientific quantitative evaluation of urban agricultural water use and management monitoring. [Methods] Using field survey data, meteorological data of Guiyang City and agricultural statistical data, based on crop water demand, water footprint method to evaluate agricultural water resources. [Results] ① The extreme value of crop water footprint depends on the extreme value of crop yield per unit area of the sample plot. The green water footprint and blue water footprint were 741.60, 153.48, 424.44 and 87.84 m^3/t. ② The green water consumption of different crops in urban agriculture was higher than the blue water consumption. The proportion of green

收稿日期: 2018-12-26 **修回日期**: 2019-05-21

资助项目: 贵州省研究生教育创新计划项目"贵州省熊康宁喀斯特环境研究生导师工作室建设"(黔教研究全 GZS 字[2016]04 号); 贵州省科学技术厅项目(黔科合 SZ 字[2012]3018 号); 贵州省环保厅项目(11904-0502212y0060)

第一作者: 李亮(1989—),男(汉族),吉林省靖宇县人,博士研究生,研究方向为喀斯特资源管理与区域发展。E-mail: 125212328@qq.com。

通讯作者: 熊康宁(1958—),男(汉族),贵州省威宁县人,硕士,教授,博士生导师,主要从事喀斯特与洞穴、资源与环境及石漠化生态治理等方面的研究。E-mail: xiongkn@163.com。

water and blue water ranged from 53.81%(cowpea) to 63.60%(tomato). ③ The three irrigation efficiencies of urban agriculture are 27.23%, 69.45% and 80.32%, respectively. ④ In 2017, the urban agricultural blue water irrigation demand is between 4.81×10^5 m^3(complete drip irrigation) and 6.93×10^5 m^3(complete ditch irrigation). [Conclusion] In 2017, the total water demand for urban agriculture in Guiyang City was 1.29×10^6 m^3, of which 8.84×10^5 m^3 was green water and 4.02×10^5 m^3 was blue water. The irrigation method has great room to improve the urban agricultural water use in Guiyang City, and the contribution rate of drip irrigation method to the urban agricultural water resource management in Guiyang City is up to 53.09%.

Keywords: urban agriculture; crop water requirements; water footprint; irrigation efficiency; green water; blue water; Guiyang City

2018 年,世界上 55%的人口居住在城市中,由于人口从农村到城市的迁移和人口自然增长,城市以增量开发的地域扩张,使得城市与农村二元格局在空间上逐渐密切起来。尽管人们普遍认为城市居民购买食物,而不是自己生产,但自 16 世纪的马丘比丘市城市环境中的有农业活动记载开始,城市农业成为许多城市居民生计的重要组成部分[1]。在城市危机时期,如战争或经济萧条时期,被用作一种生存策略,缓解社会动荡的手段[2]。城市农业定义为"在城市和城镇内外种植植物和饲养动物作为食物和其他用途,以及相关活动"[3]。它包括不同的空间尺度,从家庭的阳台、建筑物之间间隙地到公共绿地的农业[4]。一般来说,养殖活动不如种植活动常见[5],蔬菜在各种作物中占主导地位[6]。Mougeot[7]认为,城市农业显著的特点在于它是城市经济、社会和生态系统的重要组成部分,它既影响城市环境,同时又受到城市环境的影响。城市农业使用本地土地、劳动力、有机废弃物与水等资源,为城市居民提供食物,保障底层居民粮食需求,并对环境产生影响[3]。通常,城市农业具有积极的提升城市圈生态、生态服务功能、增加绿化面积、丰富城市景观和功能等经济、社会和生态影响[8],提供多种生态系统服务[9]。然而,如果使用措施不当,它也可能造成生态系统的损害[10],甚至可能对人类健康和环境产生真正的风险[3]。农业发生和发展的先决条件和重中之重就是水的问题。迄今为止,就城市水的问题研究而言,注意力主要集中在废水的利用上,其积极影响(废物资源的再利用)[11-12]和消极影响(对健康和环境的风险)[13-14]。与此相反,国内外对城市农业生产所消耗的水资源的评估鲜有研究,johnson 等人[15]开发了一个模型,通过结合激光雷达的数据输入得到太阳辐射模型,用于评估作物生长用水量。在 Lupia and Pulighe[16]和 Lupia 等人[17]的研究中,住宅菜园的灌溉需求是基于气候数据和实际土地使用类型(菜园、葡萄园、橄榄园、果园、混合作物)来计算。由于人口增长和气候变化[18],以及农业、工业和国内地区之间对淡水资源的竞争日益加剧,世界各地的供水和水质受到越来越大的威胁[19-20]。城市地区对水的竞争尤其激烈,因此,城市农业水的利用效率对水的可持续性具有关键作用。在这种情况下,必须区分作物用水的来源和用水量。Siebert 和 Doll[21]将消耗性蓝水定义为灌溉产生的作物蒸散发量,而绿色水定义为雨水渗入土壤的产生的作物蒸散发量。作物总需水是蓝色和绿色用水的总和,与作物实际蒸散发总量相对应。这种方法可以通过水足迹(WF)的概念应用于农产品。作物的水足迹定义为在种植期内计算的蒸散发量和作物产量之间的比率[22]。绿水水足迹(WFg)和蓝水水足迹(WFb)的计算方法是将作物的绿水用水量(CWUg)和蓝水用水量(CWUb)除以作物产量[22]。评估环境可为特定作物提供多少绿水,以及因此需要多少蓝水来满足其蒸散发需求,对于监测和规划地方的水资源使用具有战略意义[23]。在这方面,一些研究分析了不同的作物和环境,但大多不涉及城市地区,因为城市农业的空间分布格局破碎,限于笔者局限,目前仅查询到 Johnson 等人[15]、Lupia,Pulighe[16]和 Lupia 等人[17]3 篇考虑到了城市水足迹的相关研究。基于上述考虑,本文利用作物需水量方法,通过水足迹视角,评估贵阳市城市农业绿水、蓝水用水量及作物需水量,以期对于监测和规划城市的水资源使用提供参考。

1　材料和方法

1.1　研究区域

贵阳市位于贵州省中部,东经 106°07′—107°17′,北纬 26°11′—27°22′。辖区包括南明区、云岩区、花溪区、乌当区、观山湖区、白云区、开阳县、息烽县、修文县、清镇市,国土总面积 8 034 km^2。2017 年贵阳市年末常住人口为 3 580 万人,实现生产总值3 538 亿元,耕地有效灌溉面积 7.20×10^4 hm^2,实际灌溉面积 6.75×10^4 hm^2,粮食常量 4.59×10^5 t。贵阳市

多年平均地表水资源量为 4.52×10^9 m^3(思南以上区 4.24×10^9 m^3,蒙江区 2.72×10^8 m^3),地下水资源量为 1.36×10^9 m^3,多年平均水资源总量为 4.52×10^9 m^3,偏枯年($p=75\%$)、特枯年($p=95\%$)水资源量分别为 3.78×10^9 m^3 和 3.25×10^9 m^3。

1.2 样地选择

以生产主要目的(自给、贩卖、休闲等)、主城区分布状况、种植面积(≥100 m^2)和主要种植作物(蔬菜)为标准确定 6 个贵阳市城市农业社区菜园作为调查样地(表 1)。

1.3 数据来源

1.3.1 田野调查 在确定城市农业调查样地上开展问卷调查,问卷信息涉及:种植面积、土壤类型、灌溉(包括灌溉方法、用水来源和用水管理制度)、种植结构和播种期,以及收益率等信息(表 1);除调查问卷外,也对社区居民进行城市农业种植目的深入的访谈。

1.3.2 资料收集 2017 年的气温(最低温 T_{min} 和最高温 T_{max})、潜在蒸发量(ET_0)、降雨量(P)和有效降雨量(P_{eff})的气象数据来自贵阳市气象局。2017 年贵阳市社区农业统计数据来自贵阳市园林局城市绿化管理处。

1.4 研究方法

采用了作物需水量(CWR)方法,利用气候与作物数据,通过计算作物蒸散发过程中的绿水和蓝水用水量,评估调查样地农作物生产过程中的水消耗量和水足迹。作物需水量的定义是:在特定气候下,作物从播种到收获,作物蒸散发所需要的总用水量。并且通过降雨和/或灌溉来维持土壤的水充足,实现植物的生长和作物的产量最优[17],在此条件下对蒸散发量进行计算,即作物蒸散发量等于作物需水量。进而,通过在整个生长期内的每日作物蒸散发量(mm/d)的累积来计算作物对水的需求量。

以作物蒸散发量(ETc)与有效降雨量(ER)之间的最小值来计算绿水蒸散发量(ET_{green}):

$$ET_{green}=\min(ET_c,ER) \quad (1)$$

在灌溉季节计算蓝水蒸散发量(ET_{blue}),如果总有效降雨量低于作物蒸散发量,则蓝水蒸散发量等于作物蒸散发量与有效降雨量之间的差值;如果有效降雨量高于作物蒸散发量,则蓝水蒸散发量为 0:

$$ET_{blue}=\max(0,ET_c-ER) \quad (2)$$

作物绿水、蓝水蒸散发量(ET)单位为 mm 乘以 10 换算为作物用水量(m^3/hm^2):

$$CWU_{green}=ET_{green}\times10;\ CWU_{blue}=ET_{blue}\times10 \quad (3)$$

绿水足迹(WF_{green},m^3/t)为作物绿水用水量除以作物单位面积产量(Y,t/hm^2)。同理,蓝水足迹计算为:

$$WF_{green}=\frac{CWU_{green}}{Y};\ WF_{blue}=\frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (4)$$

变异系数(C_v)为标准差(S)与平均数($\bar{x}$)的比值用以衡量调查资料中各农产品产量变异程度,一般来说,变异系数越小,变异(偏离)程度越小,反之亦然。

$$C_v=\frac{S}{\bar{x}}\times100\% \quad (5)$$

此外,根据作物用水情况(调查样地和作物的平均值),以及所调查的社区花园采用的不同灌溉方法及其效率计算灌溉需求。最后,计算贵阳市农业活动所需的潜在总耗水量。贵阳市园林局城市绿化管理处统计数据显示,2017 年符合 Mougeot[7] 定义城市农业总面积为 105.95 hm^2,贵阳市城市农业活动所需的总耗水量即为所得总面积(hm^2)乘以平均作物用水量(m^3/hm^2)。

2 结果与讨论

2.1 调查样地基本信息特征

本研究所分析的 6 个贵阳市城市农业调查样地的种植总面积为 2 801.5 m^2,根据问卷调查显示,2017 年贵阳市各调查样地之间的特征差异较大(表 1)。单个调查样地的种植面积从 143.2 m^2(调查样地 3)到 1 532.1 m^2(调查样地 5)。6 个调查样地土壤类型以地带性黄壤、黄棕壤为主。各个调查样地的耕地被划分为不同的种植区,专门用于种植特定的作物。在灌溉方式上,6 个调查样地中有 3 个作物灌溉方式为喷灌,2 个则用的是沟灌,1 个使用滴灌。水源来源为雨水、自来水。调查涉及的调查样地既没有采用水质检测系统,也无水管理规范。所有调查样地的有机农业生产管理方式均符合《有机产品国家标准(GB/T19630)》。

2.2 调查样地蔬菜产出情况

6 个调查样地种植的主要蔬菜种类有番茄、茄子、辣椒、豇豆、黄瓜(表 2)。访谈与定量测算均显示番茄是产量最高的作物,平均产量为 30.5 t/hm^2,其次是番茄和辣椒。根据变异系数值显示,蔬菜在不同的调查样地中获得的作物产量存在相当大的差异,其中,茄子在 6 个调查样地种植产量差异显著。

表 1　调查样地蔬菜种植基本信息

样地	主城分布	种植面积/m^2	生产目的	土壤类型	水源	灌溉方式	水质检测系统	水管理规则	农业系统类型
调查样地 1	观山湖区	292.4	自给赠予	黄壤	雨水、自来水	喷灌	无	无	有机
调查样地 2	云岩区	166.9	自给休闲	黄壤	雨水、自来水	喷灌	无	无	有机
调查样地 3	花溪区	143.2	自给	黄棕壤、黄壤	雨水、自来水	滴灌	无	无	有机
调查样地 4	南明区	322.6	自给休闲	黄棕壤、黄壤	雨水、自来水	喷灌	无	无	有机
调查样地 5	乌当区	1 532.1	自给贩卖	黄壤	雨水、自来水	沟灌	无	无	有机
调查样地 6	白云区	344.3	自给赠予	黄棕壤	雨水、自来水	沟灌	无	无	有机

表 2　调查样地与贵阳市种植的作物平均产量与变异系数

种植类型	调查样地产量范围/($t \cdot hm^{-2}$)	调查样地平均产量/($t \cdot hm^{-2}$)	贵阳市平均产量/($t \cdot hm^{-2}$)	调查样地变异系数(C_v)
番茄	41.33～98.84	30.50	59.28	0.33
茄子	37.48～108.72	26.79	48.36	0.53
辣椒	36.38～59.30	20.94	30.57	0.21
豇豆	26.5～75.00	14.82	40.34	0.50
黄瓜	22.50～51.44	16.61	43.53	0.28

2.3　贵阳市 2017 年气候特征

气候与农业生产和作物生长发育密切相关,气候中的气温、光照、降水等是作物生长发育不可缺少的因素[24-25],城市农业作为农业类型之一,受气候影响是其固有特征。2017 年贵阳市年均温、年降雨量与近 50 a 平均气象数据(年平均气温 15.3 ℃;7 月平均气温为 24 ℃,1 月平均气温是 4.6 ℃,年平均总降水量为 1 129.5 mm)相比较为温暖和潮湿(表 3)。1—8 月,潜在蒸散发量增加,从 25.4～124.2 mm 不等,12 月逐渐减少到 33.2 mm。

2.4　调查样地作物绿水、蓝水与总水足迹

根据公式(1)—(4)计算得到 6 个调查样地的每种作物绿水足迹、蓝水足迹和总水足迹。由表 4 可知,由于作物单位面积产量不同,水足迹数值差异较大(表 4)。尤其是黄瓜,在调查样地 5 中的数值最高(绿水足迹 741.60 m^3/t,蓝水足迹 424.44 m^3/t),而在调查样地 1 中的茄子的数值最低(绿水足迹 153.48 m^3/t,蓝水足迹 87.84 m^3/t)。在研究中发现的水足迹极值取决于调查样地作物单位面积产量的极值(调查样地 5 的黄瓜 11.25 t/hm^2),调查样地 1 的茄子 16.87 t/hm^2)。由于城市农业总体缺定量的产量数据,在一定程度上给评估每一地点和每一作物的用水情况带来困难,通过利用 6 个调查样地的平均产量,得以克服了这些困难。由表 2 可知,调查样地平均产量与贵阳市农业统计数据相比,由于调查样地的典型非专业农业生产活动,故差异显著。

表 3　贵阳市 2017 年气象数据

月份	最低温 T_{min}/(℃)	最高温 T_{max}/(℃)	降水量 P/mm	有效降水量 P_{eff}/mm	蒸散发量 ET_0/mm
1 月	1.5	14.4	23.1	15.2	47.5
2 月	0.8	16.4	25.6	19.0	58.7
3 月	3.8	16.1	51.6	36.6	105.7
4 月	10.9	24.0	75.4	51.3	139.7
5 月	12.2	24.5	108.0	78.5	136.6
6 月	16.8	23.2	507.6	376.9	139.3
7 月	20.0	26.6	123.6	93.4	179.5
8 月	21.2	26.4	115.0	77.4	164.4
9 月	18.4	24.8	71.4	40.6	132.8
10 月	10.5	23.5	43.0	29.7	89.5
11 月	4.5	18.4	18.5	13.4	66.9
12 月	−1.0	16.0	3.2	2.4	51.2
年度	10.0	21.2	1 166.0	834.3	1 311.8

表 4　调查样地的种植作物的绿水与蓝水足迹　　单位:m^3/t

类别	样地 1		样地 2		样地 3		样地 4		样地 5		样地 6	
	WF_{gren}	WF_{blue}	WF_{gren}	WF_{blue}	WF_{gren}	WF_{blue}	WF_{gren}	WF_{blue}	WF_{gren}	WF_{blue}	WF_{gren}	WF_{blue}
番茄	168.82	96.62	278.10	159.17	278.10	159.17	278.10	159.17	363.99	208.32	403.69	231.05
茄子	153.48	87.84	278.10	159.17	444.30	254.29	494.53	283.04	379.23	217.05	445.17	254.79
辣椒	281.37	161.04	418.47	239.51	444.96	254.67	444.96	254.67	458.66	262.51	410.31	234.84
豇豆	472.77	270.58	222.48	127.33	—	—	370.68	212.15	629.66	360.38	—	—
黄瓜	324.35	185.64	471.38	269.79	370.80	212.22	—	—	741.60	424.44	370.80	212.22

注:—表示未耕种。

2.5　调查样地作物需水量及绿水、蓝水比重

调查样地中用于不同作物的消耗绿水量均高于蓝水量。根据计算结果,调查样地作物平均需水量,辣椒是消耗最多的作物(357.05 m^3),而豇豆是水消

耗最低的作物(65.12 m^3,图 1)。另一方面,绿水和蓝水的比例显示,在所有作物中,绿水占总使用量的一半以上,范围从最低 53.81%(豇豆)到最高63.60%(番茄)。以上结果仅为 2017 年的特定气候条件下有效,与贵阳市近 50 a 平均气候相比,2017 年的气候更温暖、湿润。反之,在较干旱的年份,绿水的比例将大幅下降,需要更多的灌溉来满足作物的用水需求,则将加剧城市地区由于干旱频率增加而导致水资源紧张。

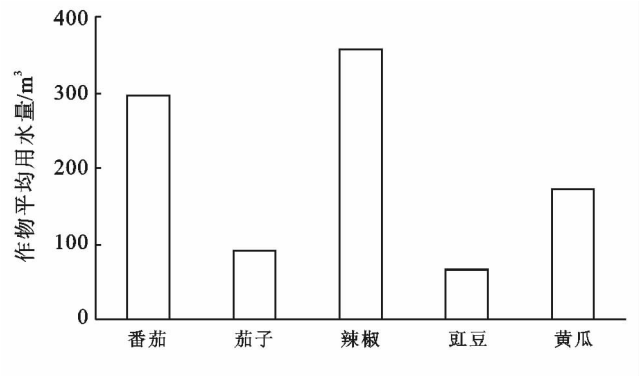


图 1 调查样地作物平均用水量

由于不同灌溉方式存在灌溉效率高低,作物生长用水量需要额外的蓝水量来满足。根据计算,6 个调查样地采用了三种方式:沟灌方式、喷灌方式和滴灌方式的效率分别为 27.23%,69.45%与 80.32%。因此,计算每 1 hm^2 作物所需的蓝水量时也需考虑不同灌溉方式的效率(图 2)。调查样地每 hm^2 所有种植作物所需的蓝水总量平均为 3 792.78 m^3/hm^2。将这种蓝水需求转化为灌溉需求,每 1 hm^2 蓝水需水量随着灌溉方式效率的下降而增加,从最低滴灌方式的4 539.08 m^3 增加到最高沟灌溉方式的 6 541.32 m^3/hm^2。

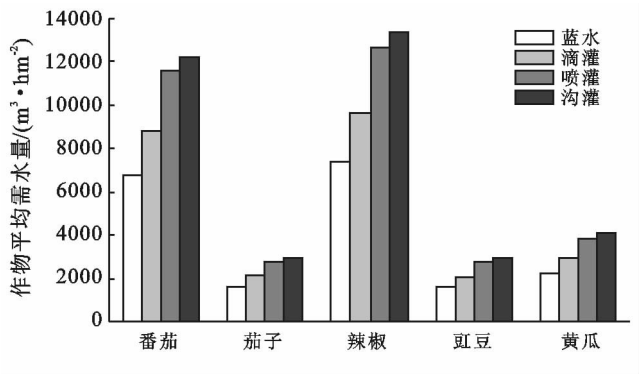


图 2 调查样地不同灌溉方式作物平均需水量与蓝水量

2017 年贵阳市城市农业用地的空间存量(105.95 hm^2),假设所有城市农业用地与调查样地分析的条件相同(气候、作物、产量、灌溉方式),计算城市农业总用水需求量为 1.29×10^6 m^3,其中 8.84×10^5 m^3 是绿水量,4.02×10^5 m^3 是蓝水量。由于所选择的灌溉方式效率的差异,考虑到最好的(滴灌)和最差的(沟灌)情况,蓝色水量灌溉需求量从大约 4.81×10^5 m^3 增加到 6.93×10^5 m^3。Pulighe 和 Lupia 等人[16]也强调了灌溉方式的重要性,定量研究了意大利罗马社区菜园蔬菜作物灌溉效率,沟灌和滴灌对灌溉用水的需求比约为 2∶1。

作物需水量给出了一个计算城市农业对城市水资源压力的方法。事实上,该方法使用了假设(即作物在最佳条件下种植)和简化(即不考虑土壤质地和水文特性)。再加上缺乏实测产量/生物量数据,可能导致灌溉用水量计算过高或过低。然而,由于城市农业在城市环境中是一个非常复杂、分布破碎与面积占比较小土地利用类型,未被重视而导致相关精确研究资料贫乏,而作物需水量法则提供简单操作以解决实际需求。

精确的定量数据将有效改善计算结果,包括土壤数据、水质数据、灌溉方式和农艺管理、作物产量、耕地的精确面积以及用于保持土壤湿度的农艺做法(覆膜)等是评估城市农业可持续性的关键要素。从这个意义上讲,为了使作物需水法方法更加可靠和便于推广,迫切需要在不同的环境(气候、土壤、社会经济、农业实践)和不同的作物中使用监测数据进行更一步的案例研究。此外,考虑了城市建筑物和树木造成的遮荫效应[26],在一般情况下对蒸散发量的影响大于降水量,从而影响到水足迹定量计算。

社区菜园作物产量空间差异不仅取决于气候条件,而且还取决于有关种植作物、灌溉方式和农艺管理的选择。另一方面,社区菜园以及其他类型的城市农业往往是“看不见的地方”和“未开发的生境”,这既因为难以获得数据,也因为其他方面,特别是与城市农业提供的生态系统有关的服务,是未来调查研究的领域(即热岛缓解、碳储存、社会联系)。

3 结 论

(1) 贵阳市城市农业作物水足迹与作物单位面积产量呈正相关。作物水足迹随着作物单位面积产量的增加而增加,由于作物单位面积产量不同,导致作物水足迹差异较大,作物水足迹极值取决于作物单位面积产量的极值。

(2) 贵阳市城市农业常见种植类型中,辣椒需水量最多,豇豆反之。同时,不同作物生长的消耗绿水量与蓝水量比差异较大,绿蓝水比值番茄最大,豇豆反之,且每种作物消耗的绿水量均高于蓝水量。

(3) 在 2017 年贵阳市当年气候条件下,由贵阳市

主城区 6 个调查样地的平均状况推演整体城市农业,得到城市农业用水量 1.29×10^6 m^3,其中 8.84×10^5 m^3 是绿水量,4.02×10^5 m^3 是蓝水量。

(4) 灌溉方式(滴灌)对贵阳市城市农业水资源管理最大贡献率 53.09%。贵阳市城市农业灌溉方式若全部选着滴灌方式,将比传统沟灌方式提升 53.09%用水效率。这对于规划可持续的城市农业来讲是一个非常关键的要素,因为仅基于所使用的灌溉方式就有可能节约近 53.09%的水量。

[参 考 文 献]

[1] De Bon H L, Parrot, Moustier P. Sustainable urban agriculture in developing countries: A review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2009,32(06):19-33.

[2] Deelstra T, Girardet H. Urban agriculture and sustainable cities[J]. Agriculture and Human Values, 1999(02):79-86.

[3] Veenhuizen, René van, Ebrary I. Cities farming for the future: Urban agriculture for green and productive cities[M]// Cities farming for the future: urban agriculture for green and productive cities. 2006.

[4] 刘剑飞,唐丽桂. 城市农业概念的演变及规范发展研究[J]. 中国农学通报,2014,30(20):95-99.

[5] 西维·奈尔,李彦超. 应时而作:城市农业与欧美城市健康危机[J]. 中国园林,2015,31(5):80-84

[6] Orsini F, Kahane R, Nono-Womdim R, et al. Urban agriculture in the developing world: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013,33(4):695-720.

[7] 吴建寨,李斐斐,杨海成,等. 美国都市农业发展及启示[J]. 世界农业,2017(8):19-24.

[8] 庞慧冉. 西方都市社区农园探析:以意大利米兰为例[C]//中国城市规划学会、贵阳市人民政府. 新常态:传承与变革:2015 中国城市规划年会论文集(06 城市设计与详细规划). 中国城市规划学会、贵阳市人民政府:中国城市规划学会,2015.

[9] 张伟. 日本社区支持农业发展管窥及其对中国的启示[J]. 农业经济,2015(8):15-17.

[10] 任柳莲. 北京社区支持农业(CSA)发展研究[D]. 安徽合肥:安徽农业大学,2015.

[11] 李菊英,盛海丰. 江苏盐城市农业面源污染防治取得的成效及对策[J]. 中外企业家,2019(1):138.

[12] 刘正良. 重庆市永川区农业水污染成因与治理对策[J]. 南方农业,2017,11(31):86-87,90.

[13] 刘帅. 吉林省长春市农业水污染问题研究[D]. 吉林 长春:吉林大学,2015.

[14] 班荣舶. 基于污染足迹模型的重庆市农业污染压力研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2014.

[15] Johnson M S, Lathuillière M J, Tooke T R, et al. Attenuation of urban agricultural production potential and crop water footprint due to shading from buildings and trees[J]. Environmental Research Letters. 2015, 10(6):064007.

[16] Lupia F, Pulighe G. Water use and urban agriculture: estimation and water saving scenarios for residential Kitchen Gardens[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015, 23(4):50-58.

[17] Lupia F, Baiocchi V, Lelo K, et al. Exploring rooftop rainwater harvesting potential for food production in urban areas[J]. Agriculture, 2017,7(6):46.

[18] 王丹. 气候变化对中国粮食安全的影响与对策研究[D]. 湖南 长沙:华中农业大学,2009.

[19] 唐登勇,张聪,杨爱辉,等. 太湖流域企业的水风险评估体系[J]. 中国环境科学,2018,38(2):766-775.

[20] 唐登勇,张聪,杨爱辉,等. 太湖流域工业园区水风险评估体系的建立与实例研究[J]. 环境科学研究,2019,32(2):219-226.

[21] Siebert S, Döu P. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation[J]. Journal of Hydrology. 2010,384(3):198-217.

[22] Egan M. The water footprint assessment manual. setting the global standard[J]. Social & Environmental Accountability Journal, 2011,31(2)181-182.

[23] Ventrella D, Stellacci A M, Castrignanò A, et al. Effects of crop residue management on winter durum wheat productivity in a long-term experiment in Southern Italy[J]. European Journal of Agronomy, 2016,77(8):88-98.

[24] 潘根兴,高民,胡国华,等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(9):1698-1706.

[25] 蔡运龙. 全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策[J]. 地理学报,1996,63(3):202-212.

[26] 蒋幸萤,兰安军,钟九生. 基于遥感反演的喀斯特地区城市热岛效应与叶面积指数相关性分析:以贵阳市为例[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2017,35(2):1-6.