

基于水足迹理论的昆明市水资源可持续利用研究^{*1}

杨子江 韩伟超

(云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650504)

【摘要】: 基于水足迹理论和计算模型及水资源可持续利用评价指标, 以昆明市 2014 年统计数据为依据, 计算了该市 2014 年的水资源足迹, 并评价了其水资源利用现状。研究表明: (1) 2014 年昆明市总的水足迹高达 $119.915 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水足迹为 $1\ 809.76 \text{ m}^3/\text{人}$; (2) 农业是昆明市耗水量最大的产业, 其水足迹达到 $43.319 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占到本市生产服务用水的 77.42%; (3) 昆明市水资源匮乏度为 241.6%, 水资源压力指数为 112.7%, 水资源利用处于不可持续状态; (4) 从产业水足迹上看, 第一产业水足迹最高, 万元产值水足迹最大, 水足迹经济效益最低, 其次是第二产业, 最后是第三产业, 其中旅游业水足迹经济效益最高, 侧面证明了旅游业是绿色低能耗产业; 因此, 需要通过调整产业结构, 在保证本地粮食安全的前提下减少作物种植和畜禽养殖, 大力发展绿色农业和旅游业, 以及从外地调水和加强虚拟水贸易等方式降低该市水资源压力, 逐步实现水资源的可持续利用。

【关键词】: 虚拟水; 水足迹; 水资源匮乏度; 水资源压力指数; 可持续利用

【中图分类号】: TV213.9 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1671-4407(2017)06-196-05

水资源短缺已经成为制约城市经济社会可持续发展的主要因素, 特别是以贵州、云南、广西为代表的我国西南地区, 处于亚热带脆弱的喀斯特环境中, 岩溶石漠化问题带来大面积的水土流失, 加剧了水资源的短缺。严重的石漠化会导致土壤肥力下降, 土壤涵养水源能力减弱, 可垦种面积减少, 局部地区小气候发生变化, 自然景观遭毁坏, 生物多样性遭破坏。在广大西南地区, 石漠化广泛分布, 由于石漠化影响及进程加快, 该地区群众多数难以维持基本生活, 水资源利用缺口较大。所以, 有必要从各类产品消费的角度研究该地区水资源实际利用情况, 这对于优化调控水资源配置, 提高水资源可持续利用水平具有重要的意义和价值。

1993 年, 英国学者 Allan^[1] 提出虚拟水的概念, 用以计算生产产品和服务所需要的水资源总量。2002 年, 荷兰屯特大学 Hoekstra^[2] 提出水足迹的概念, 用来定量研究人类对水资源真实利用状况。概念的提出引起了国内外学者的广泛关注, 开始从水足迹的理论和研究方法研究人类生产和消费与水资源利用之间的关系。目前, 水足迹方面的研究成果主要包括以下方面: ①从研究区域来看, 主要集中在北方且经济较为发达的地区^[3-4]。②从研究时空尺度来看, 主要涉及全国及省市或区域尺度, 时间跨度一般以一年或数年为主^[5-7]。③从研究对象来看, 仍主要针对主要农作物产品或动物产品, 而较少涉及建筑业用水、工业用水或第三产业用水, 尤其是生态环境用水, 也缺乏从三产的角度计算水足迹^[8-9]。

昆明市处于西南岩溶石漠化地区, 水资源短缺是制约经济和社会发展的主要限制因素。特别是昆明作为我国面向东南亚、南亚开放的门户城市以及面向东南亚、南亚的区域性金融中心, 未来城市的发展是需要大量的水资源供给。因此, 从各类产品消费的角度衡量水资源开发利用状况, 优化水资源配置十分重要。基于此, 本研究在水足迹理论及其模型的基础上, 尽可能全

¹ **项目基金**: 云南大学第四批“中青年骨干教师培养计划”项目(XT412003)

第一作者简介: 杨子江(1975—), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为旅游景区规划、国家公园管理等。

E-mail:617837796@qq.com

面地考虑水足迹的组成部分，结合昆明市实际情况，加入了建筑业、第三产业、游客用水以及灰水足迹，并分别计算了三产总的水足迹状况及其经济效益。之后通过对 2014 年昆明全市水足迹、人均水足迹、水资源匮乏度、水资源压力指数等计算，分析了昆明水资源利用现状，探讨昆明市降低水足迹并缓解水资源压力的方式与措施，希望为昆明市未来水资源可持续利用提供政策依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区状况

昆明是我国面向东南亚、南亚开放的门户城市，国家级历史文化名城，我国重要的旅游、商贸城市，西部地区重要的中心城市之一。昆明市为山原地貌，地势大致北高南低，多溶洞和溶岩地貌，溶岩盆地有石林坝子。2014 年年末全市常住人口 662.6 万人，其中城镇人口 457.5 万人。2014 年接待国内外游客 6 268.66 万人次，其中，国内游客 6 149.45 万人次，海外游客 119.21 万人次。全市水资源总量为 $49.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。近年来，农业、工业、生活、第三产业用水矛盾日益加剧，已成为制约昆明经济社会发展的主要因素。

1.2 数据来源

本研究的数据来源包括：国际虚拟水研究成果中的相关成果、《2014 年云南水资源公报》《云南省统计年鉴 2015》《昆明市统计年鉴 2015》《2014 年昆明市国民经济和社会发展统计公报》《云南省地方标准用水定额 2013》《地表水环境质量标准》（GB3838—2002）、《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册 2008》《全国水环境容量核定技术指南 2003》《畜禽养殖业污染物排放标准》（GB18596—2001）。

1.3 研究方法

1.3.1 地区水足迹核算

水足迹指的是在一定物质生活标准下，生产一定人群（个体、城市或国家）消费的产品和服务所需要的水资源数量^[10]。一个国家或地区的实际水资源使用量不仅包括区域内产品生产或者服务所需的本地水资源总量，还包括区域进口产品和服务的虚拟水总量。其计算方法主要有 2 种：①自上而下法，即用本地用水总量加上虚拟水进口量，再减去虚拟水出口量；②自下而上法，即区域内消费的商品和服务用水量之和^[11]。本研究采用自上而下的方法计算水足迹。水足迹的核算一般考虑两大部分即内部水足迹和外部水足迹，但是，随着研究的深入，很多学者开始考虑灰水足迹^[12]。本研究基于以上研究成果并力求考虑全面，加入灰水足迹。地区水足迹的计算公式为：

$$WFP=IWFP+EWFP+GWFP \quad (1)$$

式（1）中： WFP 为地区水足迹； $IWFP$ 为本地居民生产服务用水量，即内部水足迹； $EWFP$ 为本消费中进口虚拟水总量，即外部水足迹； $GWFP$ 为消纳产品生产过程中的污染物负荷所需要的淡水水量，即灰水足迹。其中，内部水足迹 $IWFP$ 的计算公式为：

$$IWFP=AWU+IWW+DWW+EWW-VWE_{dom} \quad (2)$$

式(2)中： AWU 为地区农业生产用水量； IWW 为地区工业生产用水量； DWW 为地区城市生活用水量； ENW 为地区生态用水量； VWE_{dom} 为地区出口虚拟水量。

1.3.2 本地生产服务用水量

在本研究中，昆明本地用水量包括农业用水、工业用水、城市生活用水以及生态环境用水4类。农业用水量由农作物产品用水量和动物产品用水量两部分构成。计算公式如下：

$$WF_C = \sum_{j=1}^n VWC_C \times P_C \quad (3)$$

$$WF_L = \sum_{j=1}^n VWC_L \times P_L \quad (4)$$

式(3)~(4)中： WF_C 为农作物产品用水量； VWC_C 为农作物产品单位虚拟水含量； P_C 为第 j 类农作物产品的产量； WF_L 为动物产品用水量； VWC_L 为动物产品单位虚拟水含量； P_L 为第 j 类动物产品的产量； n 为产品的种类数。

农作物产品单位虚拟水含量采用Chapagain &Hoekstra^[13]计算的中国农作物产品单位虚拟水含量成果以及王新华等^[14]计算的云南省农作物产品单位虚拟水含量成果；动物产品的虚拟水含量则是依据Chapagain &Hoekstra^[12]计算的中国动物产品的虚拟水含量研究成果。在本研究中，工业、生态用水量的数据来自于《云南省统计年鉴2015》和《昆明市统计年鉴2015》中统计的实际耗水量。

城市生活用水除了居民生活用水外，还要考虑公共生活用水，比如建筑业用水、第三产业用水和流动人口（主要是游客）用水。居民用水量采用城乡居民人口乘以城乡居民用水定额来计算，建筑业用水、除旅游业之外的第三产业用水分别采用建筑业用水定额法、万元产值用水量法计算，旅游业用水采用国内外游客量乘以国内外游客人均日用水量计算。

1.3.3 对外贸易虚拟水含量

对外贸易的虚拟水含量包括进口产品的虚拟水含量以及出口产品的虚拟水含量。对外贸易产品主要是农业产品与工业产品。对外贸易的虚拟水含量为进口虚拟水总量与地区出口虚拟水量之差。其中，本消费中进口虚拟水总量的计算公式为：

$$EWFP = VWI - VWE_{re-export} \quad (5)$$

式(5)中： $EWFP$ 为本消费中进口虚拟水总量； VWI 为进口产品的虚拟水含量； $VWE_{re-export}$ 为进口产品再出口的虚拟水含量。

1.3.4 灰水足迹核算

灰水足迹是指以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准，将一定的污染负荷吸收同化所需的最小淡水量。本研究统一选取化学需氧量(COD)作为衡量水质的指标计算灰水足迹 $GWFP$ ，其计算公式为：

$$GWFP = Q_{COD} / C_{COD} \times 100 \quad (6)$$

式(6)中： C_{cod} 表示地表水中COD环境标准值，mg/L； $QCOD$ 是指各类污染源排放的COD总量，万吨。 Q_{cod} 通常采用《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中Ⅲ类水的标准限值20 mg/L。

本研究的灰水足迹核算主要包括工业污染、本地居民生活污染、游客污染、农业面源污染以及畜牧养殖污染等五个方面。其中工业污水与生活污水中COD排放量直接来自于《云南省统计年鉴2015》和《昆明市统计年鉴2015》中的统计数据。游客旅游COD排放量采用人均产污系数法来计算，即日均游客量乘以旅游天数再乘以人均产污系数。农业面源污染采用农业源强系数法计算，即修正后的农业源强系数乘以农业种植面积。畜牧养殖污染采用单位畜禽产污系数法计算，即单位畜禽产污系数乘以畜禽数量。

1.3.5 水资源安全评价指标

水资源安全评价指标主要有水足迹、水资源匮乏度以及水资源压力指数。水足迹是地区总水足迹与地区常住人口的比值。而水资源匮乏度是地区总水足迹与地区可利用水资源量的比值。水资源压力指数是地区内部水足迹与外部水足迹之和与可利用水资源量的比值。水资源匮乏度、水资源压力指数超过1，则表示地区实际用水量超过本地可用水量，而且值越大，说明水资源短缺越严重。水资源匮乏度与水资源压力指数的计算分别见公式(7)、公式(8)：

$$WS = WFP / WA \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中： WS 为水资源匮乏度； WFP 为地区水足迹； WA 为地区可利用水资源总量。

$$WSI = (IWFP + VWE_{dom}) / WA \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中： WSI 为水资源压力指数； $IWFP$ 为内部水足迹； VWE_{dom} 为地区出口虚拟水量； WA 为地区可利用水资源总量。

2 结果与分析

2.1 昆明市本地生产服务用水量

2.1.1 农畜产品生产用水量计算

根据公式(3)~(4)和相关研究成果计算得出昆明市2014年主要农畜产品的虚拟水含量和生产用水量(表1)。从表1可以看出，生产用水量较大的产品依次为粮食、猪肉、蔬菜、牛肉、禽肉、禽蛋等，说明昆明市居民对基本的日常营养饮食比较重视，昆明市依然有较高的农业基础水平；而水果、奶类、水产品生产用水也占有一定比重，说明昆明市居民的生活水平也在不断提高；在作物产品方面，除了粮食、水果、蔬菜这些生活必需品之外，烤烟的生产用水所占的比重大，说明昆明市是云南省主要的烤烟产区之一，而油料、甘蔗、茶叶不是昆明市主要的经济作物。

表1 昆明市2014年农畜产品生产用水量

产品	虚拟水含量/(m ³ /kg)	产量/万吨	生产用水量/10 ⁸ m ³
粮食	0.820	123.570	10.132
油料	0.907	1.500	0.136
甘蔗	0.117	0.110	0.001
烤烟	1.881	7.460	1.403
茶叶	11.110	0.010	0.011
水果	0.830	18.530	1.538
蔬菜	0.220	262.560	5.776
猪肉	2.210	37.420	8.270
牛肉	12.560	3.720	4.666
羊肉	5.202	1.970	1.025
禽肉	3.650	11.550	4.217
奶类	1.000	79.360	1.178
禽蛋	3.550	60.590	2.888
水产品	5.000	87.010	2.076
合计	—	695.360	43.319

2.1.2 城市生活用水量计算

根据《云南省统计年鉴 2015》和《昆明市统计年鉴 2015》统计，2014 年昆明市城镇人口、乡村人口分别为 457.5 万人、205.1 万人，参照《云南省地方标准用水定额 2013》中的规定，昆明市城镇居民、乡村居民用水定额分别为 160 升/(人·天)、80 升/(人·天)，则昆明市城镇居民、乡村居民用水量分别为 $2.672 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.599 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，城乡居民用水量为 $3.271 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据《2014 年昆明市国民经济和社会发展统计公报》统计，2014 年除旅游业之外的第三产业产值为 1378.13 亿元，万元地区生产总值取水 12.54 m^3 /万元，2014 年建筑业企业房屋建筑施工面积为 $9310.91 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，2014 年接待国内游客 6149.45 万人次，海外游客 119.21 万人次。参照《云南省地方标准用水定额 2013》中的规定建筑业用水定额为 $1.3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ，及旅游基础设施规划规定的国内外游客人均日用水定额分别为 250 升/(人·天)、450 升/(人·天)，则建筑业用水量、除旅游业之外的第三产业用水量、旅游业用水量分别为 $1.210 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.728 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.159 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，城市生活用水总量为 $6.368 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 2)。

表2 昆明市2014年城市生活用水量

项目	城乡居民用水		建筑业用水	第三产业用水(除旅游业)	旅游业用水	合计
	城镇居民用水	乡村居民用水				
用水量 / $\times 10^8 \text{ m}^3$	2.672	0.599	1.210	1.728	0.159	6.368
占总量的比例 / %	41.96	9.41	19.00	27.14	2.50	100

2.1.3 本地生产服务用水量计算

根据《云南省统计年鉴 2015》和《昆明市统计年鉴 2015》，2014 年昆明市工业用水量以及生态用水量分别为 $5.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。据此得出昆明市 2014 年本地生产服务用水量（表 3）。从表 3 可知，昆明市 2014 年农作物产业和动物产品的用水量最大，农业用水量占本地生产服务用水量的比重高达 77.42%，而工业用水的比重只有 10.17%，说明农业种植与畜牧养殖是昆明本地生产中的主要用水部门。主要原因：一是昆明市的农业基础较好，农作物种植面积相对较大，且高原地区蒸发量较大，坡度高水资源利用率低。猪、牛、羊、家禽养殖规模大，生产需水量大；二是昆明工业发展水平有限，高耗水的工业部门不多，大部分工业用水也可以回收再利用，因而其工业耗水量相对较少。

表3 昆明市2014年本地生产服务用水量

项目	农业用水		生活用水	工业用水	生态用水	合计
	作物产品用水	动物产品用水				
用水量 / 10^8 m^3	18.997	24.322	6.368	5.690	0.580	55.957
占总量的比例 / %	33.95	43.47	11.38	10.17	1.04	100

2.2 昆明市对外贸易虚拟水量

限于实际统计数据缺乏，农畜产品虚拟水进出口量采用以下方法进行估算：首先根据城乡居民年均消费食物量，计算消费的虚拟水量，再根据具体年份生产的农产品计算生产的虚拟水量，二者之差就是虚拟水贸易量。

根据《云南省统计年鉴 2015》中 2014 年昆明市常住人口统计数据以及粮食、油料、蔬菜、禽肉、水产品、蛋类、奶类、水果、茶叶、猪肉、牛肉、羊肉、烟叶、糖果、酒类的产量数据，以及《昆明市统计年鉴 2015》中居民人均粮食、油料、蔬菜、禽肉、水产品、蛋类、奶类、水果、茶叶、猪肉、牛肉、羊肉、烟叶、糖果、酒类的消费量，利用贸易平衡，结合各单位产品虚拟水含量数据，计算出 2014 年昆明市对外贸易中各产品输入的虚拟水量，见表 4。

表4 昆明市2014年对外贸易农业产品输入的虚拟水量

项目	人均消耗量 /kg	消耗量 /万吨	产量 /万吨	贸易输入量 /万吨	单位虚拟水含量 /(m ³ /kg)	输入的虚拟水含量 /10 ⁸ m ³
粮食	95.05	62.980	123.570	-60.590	0.820	-4.968
油料	7.80	5.168	1.498	3.670	0.907	0.333
蔬菜	91.57	60.674	262.560	-201.89	0.220	-4.441
禽肉	7.38	4.890	11.554	-6.664	3.650	-2.432
水产品	5.75	3.810	4.152	-0.342	5.000	-0.171
蛋类	4.74	3.141	8.136	-4.995	3.550	-1.773
奶类	10.94	7.249	11.784	-4.535	1.000	-0.454
水果	31.65	20.971	18.530	2.442	0.830	0.203
茶叶	0.27	0.179	0.005	0.174	11.110	0.193
猪肉	19.89	13.179	37.421	-24.242	2.210	-5.358
牛肉	2.45	1.623	3.715	-2.092	12.560	-2.627
羊肉	0.59	0.391	1.971	-1.580	5.202	-0.822
烟叶	29.27	19.394	7.457	11.937	1.881	2.245
糖果	7.94	5.261	0	5.261	1.041	0.548
酒类	5.72	3.790	0	3.790	1.766	0.669
合计	—	—	—	—	—	-18.855

根据《2014年云南省水资源公报》，2014年云南省万元国内生产总值用水量为117 m³。而据《云南省统计年鉴2015》统计，2014年昆明市出口贸易额为710.232亿元，进口贸易额为378.093亿元，净出口额为332.139亿元，由此得出昆明市工业产品对外贸易虚拟水的净输出量为3.886×10⁸ m³（表5）。

表5 昆明市2014年对外贸易虚拟水量（单位： 10^8 m^3 ）

项目	对外贸易输入	对外贸易输出	虚拟水贸易平衡
粮食	0	4.968	-4.968
油料	0.333	0	0.333
蔬菜	0	4.441	-4.441
禽肉	0	2.432	-2.432
水产品	0	0.171	-0.171
蛋类	0	1.773	-1.773
奶类	0	0.454	-0.454
水果	0.203	0	0.203
茶叶	0.193	0	0.193
猪肉	0	5.358	-5.358
牛肉	0	2.627	-2.627
羊肉	0	0.822	-0.822
烟叶	2.245	0	2.245
糖果	0.548	0	0.548
酒类	0.669	0	0.669
工业产品	4.424	8.310	-3.886
合计	8.615	31.356	-22.742

从表5中可以看出，2014年昆明市贸易输出虚拟水量为 $31.356 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，贸易输入为 $8.615 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，净输出水量为 $22.742 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中，工业产品虚拟输出水量为 $8.310 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占虚拟水输出总量的26.5%，农产品虚拟输出水量为 $23.046 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占虚拟水输出总量的73.5%。总的来说，昆明市对外贸易输出以农产品为主，特别是粮食、蔬菜、肉类、蛋类等输出水量较多，反应出昆明市有较好的农业基础。

2.3 昆明市灰水足迹计算

根据《云南省统计年鉴2015》中的统计数据，昆明市工业污水与生活污水中的COD排放量分别为1.64万吨、1.42万吨，再通过公式（6）计算得出昆明市工业灰水足迹、生活灰水足迹分别为 $8.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册2008》，昆明市人均产污（COD）系数为72克/（人·天），2014年昆明市游客量为6268.66万人次，则昆明市游客旅游COD排放量为0.451万吨，然后通过公式（6）计算得出昆明市游客灰水足迹为 $2.257 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据《全国水环境容量核定技术指南2003》，标准农田源强系数为COD10千克/（亩·年）（1亩=1/15公顷）。其中，标准农田指的是平原，种植作物为小麦，土壤类型为壤土，化肥施用量为25~35千克/（亩·年），降水量在400~800mm范围内的农田。根据昆明市的农田状况，按照该指南规定的不同等级的坡度、农作物类型、土壤类型、化肥使用量、降雨量等情况进行修正，最终的修正系数为1.0692，修正后的农田源强系数为160.38千克/公顷，2014年昆明市农作物播种面积为45.48万公顷，则昆明市农业种植COD排放量为7.294万吨，之后通过公式（6）计算得出昆明市农业种植灰水足迹为 $36.470 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

同样，根据《全国水环境容量核定技术指南2003》规定，畜禽养殖量需要通过统计年鉴及必要的调查获得，并需换算成猪，换算关系如下：30只蛋鸡折合为1头猪，60只肉鸡折合为1头猪，3只羊折合为1头猪，5头猪折合为1头牛。《畜禽养

殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)对养殖场的排水量和污染物浓度均有规定,按标准折合每头猪的COD排放量为17.9克/(头·天)。2014年昆明市牛的存栏量为61.11万头,猪、羊、家禽的出栏量分别为436.98万头、91.25万只、6816.56万只,按标准折合后猪的数量为1000.17万头,则昆明市畜禽养殖COD排放量为6.535万吨,通过公式(6)计算得出昆明市畜禽养殖灰水足迹为 $32.673 \times 10^8 \text{ m}^3$,昆明市灰水足迹总量为 $86.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表6)。

表6 昆明市2014年灰水足迹

项目	工业	生活	游客	农业种植	畜禽养殖	合计
用水量/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	8.200	7.100	2.257	36.470	32.673	86.700
占总量的比例/%	9.46	8.19	2.60	42.06	37.69	100

从表6可以看到,2014年昆明市灰水足迹高达 $86.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中农业种植、畜禽养殖灰水足迹分别 $36.470 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $32.673 \times 10^8 \text{ m}^3$,农业灰水足迹所占比重高达79.75%,而工业、生活、游客总的灰水足迹只有 $17.557 \times 10^8 \text{ m}^3$,占20.25%。

2.4 昆明市水足迹分析与水资源利用可持续评价

根据公式(1)~公式(6),初步计算了昆明市2014年的水资源足迹(表7)。从表7可以看出,昆明市2014年总的水足迹为 $119.915 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中农业用水为 $43.319 \times 10^8 \text{ m}^3$,灰水足迹为 $86.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,这两个部分的用水量较大,用水结构亟待调整,农业用水与灰水足迹突出问题需要引起昆明市相关部门的重视。而通过表8中三产业水资源足迹与其经济效益对比可以看出,第一产业水资源足迹最高,经济效益最小,其次是第二产业,第三产业水资源足迹最低,其产生的经济效益最大。在第三产业中,旅游业水资源足迹最低,创造的经济效益最大,侧面证明了旅游业确实是绿色低能耗产业,昆明市发展旅游业具有较高的经济收益与生态环境收益。

表7 昆明市2014年水资源足迹计算结果

项目	虚拟水量/ 10^8 m^3	人均水足迹/(m^3 /人)
农业用水(作物产品、动物产品)	43.319(18.997、24.322)	653.77(286.70、367.07)
工业用水	5.690	85.87
生活用水	6.368	96.11
生态用水	0.580	8.75
对外贸易	-22.742	343.22
灰水足迹	86.700	1308.48
总计	119.915	1809.76

表8 昆明市2014年各产业水资源足迹及其经济效益对比

项目	水资源足迹 /10 ⁸ m ³	产值 / 亿元	万元产值水足 迹 /m ³
第一产业	93.607	181.56	5 155.71
第二产业	11.214	1 538.53	72.89
第三产业(除旅游业)	8.828	1 378.13	64.06
旅游业	2.416	614.77	39.30
总计	116.065	3 712.99	312.59

根据《云南省统计年鉴 2015》中的统计数据，2014 年昆明市水资源总量为 $49.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，通过公式（7）~公式（8）计算得出，昆明市 2014 年人均水资源足迹为 $1 809.76 \text{ m}^3/\text{人}$ ，水资源匮乏度为 241.6%，水资源压力指数为 112.7%。这说明了昆明市现有的水量不足以承载经济社会的发展，水资源短缺严重，水资源供给难以为继。

3 结论与建议

本文在水足迹理论和计算模型的基础上，依据昆明市 2014 年的统计数据，对昆明 2014 年各产业部门的水资源利用情况进行研究，得出结论如下：

（1）2014 年昆明市总的水资源足迹为 $119.915 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，人均水资源足迹为 $1 809.76 \text{ m}^3/\text{人}$ 。与荷兰国际水文和环境工程研究所（IHE）的水足迹研究成果^[1]：全球年人均水资源足迹为 $1 240 \text{ m}^3/\text{人}$ ，中国年人均水资源足迹为 $702 \text{ m}^3/\text{人}$ 相比，2014 年昆明人均水资源足迹已明显高于全球和全国平均水平，水资源问题比较严峻。

（2）从水足迹结构上看，灰水足迹是昆明市水资源消耗量最大的部分，高达 $86.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；其次是农业用水，为 $43.319 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；工业用水、生活用水和生态用水相对较小。因此，建议在保证本地食品供给安全的前提下，降低农作物种植及畜牧养殖规模，减少农产品贸易输出，降低农业用水；同时，要改变现有粗放式的农业发展方式，鼓励发展绿色农业、节水农业，走集约型经济发展道路，降低灰水足迹特别是农业灰水足迹。

（3）从三产水资源足迹结构上看，第一产业是昆明市水资源消耗量最大的产业，达到 $93.607 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占三产总水资源足迹的 80.65%，而其创造的经济效益只有 181.56 亿元。第二产业、第三产业的水资源消耗较小，只有 $11.214 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $11.244 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中旅游业水资源足迹最小，仅有 $2.416 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，而其创造的经济效益高达 614.77 × 10⁸ 元，万元产值水足迹仅为 39.30 m^3 。所以，需要进一步优化产业结构，在保证农业基础的前提下大力发展第三产业特别是旅游业，转变居民消费理念，选择耗水量较少的替代产品，从节流的角度控制水资源的消耗，实现地区水资源足迹的降低。

（4）2014 年昆明市水资源匮乏度为 241.6%，水资源压力指数为 112.7%，说明昆明市水资源系统已经超载，水资源短缺问题突出，无法满足经济社会生态快速发展的需要。为此，除了优化产业结构，发展绿色低碳产业、集约型经济外，可通过从外地调水和加强虚拟水贸易等方式增加水资源供给，缓解水资源压力，实现水资源可持续利用。

参考文献：

[1] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water: Otherwise our hydro-political futures would be impossible [C]// Priorities for water resources allocation and management. London, United Kingdom: ODA, 1993: 13-26.

[2] Hoekstra A Y. Virtual water trade [C]// Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade (No.12). Delft:IHE, 2003.

[3] 王艳阳, 王会肖, 蔡燕. 北京市水足迹计算与分析[J]. 中国生态农业学报, 2011 (4) : 954-960.

[4] 孙艳芝, 鲁春霞, 谢高地, 等. 北京市水足迹[J]. 生态学杂志, 2015 (2) : 524-531.

[5] 祝稳, 赵锐锋, 谢作轮. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价[J]. 水土保持研究, 2015 (1) : 292-298, 304.

[6] 翁清, 马骏, 袁军. 基于水足迹理论的苏北地区水资源评价[J]. 中国农村水利水电, 2016 (4) : 33-37.

[7] 王新华, 徐中民, 龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. 冰川冻土, 2005 (5) : 774-780.

[8] 宋永永, 米文宝, 杨丽娜. 基于水足迹理论的宁夏水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2015 (5) : 58-62.

[9] 吴兆丹, 赵敏, Lall U, 等. 关于中国水足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2013 (11) : 73-80.

[10] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1963-1974.

[11] Van Oel P R, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment [J]. Ecological Economics, 2009, 69: 82-92.

[12] 成润禾, 潘丽君, 朱洪利. 西部大开发 10 年云南省水足迹账户核算与动态评估[J]. 环境科学与技术, 2015 (3) : 195-199.

[13] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations [R].Delft: Institute for Water Education, 2004.

[14] 王新华, 龚爱民, 郭美华, 等. 基于水足迹的云南省大理州水资源利用评价[J]. 安徽农业科学, 2010 (20) : 10870-10874.