

湖南省相对水资源承载力时空变化分析

曾红春^{1,2}, 杨奇勇¹, 李文军³, 谢运球¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所 岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 湖南文理学院 资源与环境旅游学院, 湖南 常德 415000)

摘要: 采用相对水资源承载力的研究方法, 分别以全国和湖南省为参照区域, 分析湖南省及其14个地州市2000-2015年间相对水资源人口承载力、农业承载力和经济承载力的时间动态变化及空间差异。结果表明: 湖南省水资源相对丰富, 水资源承载力年际变化大, 水资源承载力各地州市分布不均。从水资源承载力的动态变化上看, 湖南省水资源承载的人口和GDP一直处于双重富余状态, 而农业由富余状态逐渐变为超载状态, 但是人口、农业和GDP水资源总量承载潜力较大, 基本处于三重富余状态(除2011年)。从水资源承载力的空间分布来看, 湖南省西部与南部地州市的人口、农业及经济水资源承载力潜力高, 而北部、东部及中部地州市水资源承载力潜力低。研究为湖南省水土资源合理利用及经济持续发展提供科学参考。

关键词: 水资源; 相对水资源承载力; 时空变化; 湖南省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0069-06

Spatial-temporal change analysis of relative carrying capacity of water resources in Hunan Province

ZENG Hongchun^{1,2}, YANG Qiyong¹, LI Wenjun³, XIE Yunqiu¹

(1. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Institute of Karst Geology, Chinese

Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083,

China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

Abstract: Taking the whole China and the whole Hunan Province as reference zones, the temporal dynamic change and spatial difference of the relative population carrying capacity of water resources (RPCCWR), relative agricultural carrying capacity of water resources (RACCWR) and relative economic carrying capacity of water resources (RECCWR) were calculated for the whole Hunan Province and its 14 cities from 2000 to 2015 were analyzed. The result showed that Hunan Province was at the stage of relatively abundance of water resources. However, the RCCWR for Hunan Province changed largely from 2000 to 2015 and it distributed unevenly across the whole province. The economic development was lagged. As far as dynamic change of water resource was concerned, both RPCCWR and GDP were in a state of double surplus, while RACCWR has gradually changed from surplus to overloaded. The RPCCWR, RACCWR and RECCWR were in triple surplus and the potential RCCWR was relatively high(except in 2011). Taking spatial distribution of RCCWR into account, the potential of RPCCWR, RACCWR and RECCWR was high in the west and south of Hunan Province, and low in the north, east and middle. The study provides a scientific reference for reasonable utilization of water and land and sustainable economic development in Hunan Province.

Key words: Water resources; Relative carrying capacity of resources; Spatial-temporal change; Hunan Province

1 研究背景

水是生命之源,是不可或缺的自然资源,但经济

快速发展和人口持续增长对水资源的需求量不断地增加,加之水污染导致水资源浪费严重等问题引起的水质型水资源短缺日益严峻,区域水资源承载力

收稿日期:2017-10-12; 修回日期:2017-12-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502404); 广西科学研究与技术开发项目(桂科攻1598016-11)

作者简介:曾红春(1990-),女,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为生态地球化学。

通讯作者:杨奇勇(1976-),男,湖南邵阳人,博士,研究员,硕士生导师,研究方向为水土资源持续高效利用。

已引起地区政府和相关学者的高度关注,分析区域水资源承载力时空差异,可为协调不同区域水资源的合理、高效利用提供参考,对实现区域社会、经济可持续发展具有重要现实意义^[1-2]。国际上,联合国教科文组织(UNESCO)于20世纪80年代提出了“资源承载力的概念”,并较早地进行土地资源承载力的研究^[3],但对水资源承载力的研究较少,主要研究地表水和地下水资源的综合利用在灌溉农业中的可持续发展^[4],把农业水资源承载力作为衡量区域发展潜力的标准之一^[5]。相比之下,1989年新疆资源软科学课题组^[6]最早针对水资源承载力进行研究。随后,一大批学者^[7-10]先后对我国水资源承载力进行了深入研究,在学术界掀起了水资源承载力研究的热潮。最常见的水资源承载力评价方法主要有模糊综合评判法^[11]、主成分分析法^[12-13]、常规趋势法^[7,14]、系统动力学方法^[15]、多目标决策分析法^[16-17]、投影寻踪法^[18]、和人工神经网络^[19]等。这些方法各有特点,但在具体的分析过程中存在一定的局限性^[20],并且模型的精度很难控制。为此,国内学者黄宁生等^[21]于2000年提出了相对资源承载力的概念。即相对资源承载力是以选择一个或数个参照区作为对比标准,根据参照区的人均资源拥有量和消费量,计算研究区域相对于参照区域的各类资源的相对承载力^[22],该方法已在区域水资源承载力评价中得到广泛应用^[23-24]。湖南省水资源总量相对丰富,为农业用水大户,但时空分布不均、部分地区配套的水利设施相对落后,不合理的农业灌溉使得水资源损耗严重。此外,不同地州市人口状况、农业生产状况、经济发展水平、水资源禀赋条件和开发利用程度均存在不同程度的差异,因此各地州市水资源承载力也是不一样的。为此,本文选取水资源利用量和水资源总量2个指标,采用相对水资源承载力的方法,分别以整个湖南省和湖南省14个地州市为研究对象,研究其水资源所承载的人口、农业和经济等的动态变化和空间差异,以期对湖南省水土资源持续高效利用和经济持续发展提供科学参考。

2 研究区域概况

湖南省地处中国中南部(108°36'~114°15'E、24°37'~29°13'N),土地面积21.18×10⁴ km²,占全国总面积的2.2%,辖14个地州市。属于亚热带季风区,年平均气温在15~18℃之间,水资源总量相对丰富,年平均降水量1200~1700 mm之间,气候

湿润,降水较多,但季节分布不均匀,年际变化大,水旱灾害频繁。地势为东、西、南三面环山的马蹄形,北部和中部相对低平。省内河流交错纵横,长度大于5 km以上的河流共5341条,大多属于湘、资、沅、澧四大水系及其支流,自东、西、南三面向洞庭湖汇集,形成了一个比较完整的洞庭湖水系,湖南省水系及行政区划如图1所示。根据湖南省2013年的数据统计,其天然水资源总量为2680×10⁸ m³,地表水(浅层)资源总量为1420×10⁸ m³,地下水资源总量为350×10⁸ m³,人均占有量为2996.2 m³,为全国人均水量的1.3倍,废水排放总量达30.7227×10⁸ t,约占全国排放总量的4.42%。由于近年来湖南省经济的快速发展,人口的增加以及城市化进程的加快,各地州市的用水量不断增加,废水和污水的排放造成了一定的生态环境问题^[25]。根据预测湖南省未来20年水资源供需矛盾十分突出,水资源承载力不足以维持经济和社会的稳定发展,如不采取措施到2025年湖南省水资源将出现严重的紧张局面^[26]。

3 研究方法数据来源

3.1 水资源相对承载力

本文根据湖南省的实际情况,参考已有的研究,将相对水资源承载力方法用于湖南省人口、农业和经济相对水资源承载力的动态变化和空间差异研究中,计算公式如下。

相对水资源人口承载力:

$$C_{rp} = I_1 \cdot Q_{w1} \quad (1)$$

$$I_1 = Q_{p0} / Q_{w0} \quad (2)$$

相对水资源农业承载力:

$$C_{rg} = I_2 \cdot Q_{w1} \quad (3)$$

$$I_2 = Q_{g0} / Q_{w0} \quad (4)$$

相对水资源经济承载力:

$$C_{re} = I_3 \cdot Q_{w1} \quad (5)$$

$$I_3 = Q_{e0} / Q_{w0} \quad (6)$$

式中: C_{rp} 为研究区相对水资源人口承载力,10⁴人; C_{rg} 为相对水资源农业承载力,10³ hm²; C_{re} 为相对水资源经济承载力,10⁸元; I_1 为水资源人口承载指数,10⁴人/10⁸ m³; I_2 为水资源农业承载指数,10³ hm²/10⁸ m³; I_3 为水资源经济承载指数,10⁸元/10⁸ m³; Q_{w1} 和 Q_{w0} 分别为研究区和参照区的水资源量(包括水资源总量和水资源利用量),10⁸ m³; Q_{p0} 为参照区的人口数; Q_{g0} 为农业播种面积,10³ hm²; Q_{e0}

为 GDP,10⁸ 元。

通过实际人口数、农业播种面积和 GDP 量与其相对水资源承载力对比,将水资源承载力的承载状态划分为 3 种类型:(1) 富余状态,实际承载量小于相对承载力。(2) 临界状态,实际承载量等于相对承载力。(3) 超载状态,实际承载量大于相对承载力。

3.2 数据来源及处理

本文中选用(2000 - 2015 年)16 年全国和湖南省人口数、农作物播种面积、水资源总量、水资源利用量和 GDP 等指标,数据来源于《中国水资源公报》、《中国统计年鉴》、《湖南省水资源公报》和《湖南省统计年鉴》。利用 Excel 对 16 年湖南省水资源承载力和湖南省 14 个地州市平均承载力进行计算,采用 ArcGIS10.0 和 Origin 8.1 进行相关图形绘制。

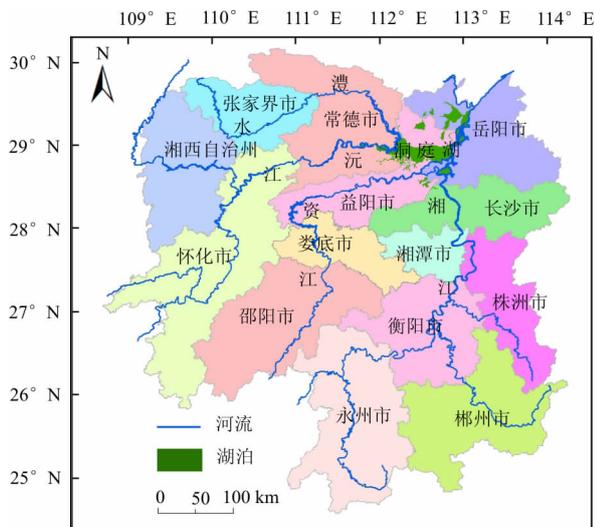


图 1 湖南省水系及行政区划

4 结果与分析

4.1 水资源承载力动态变化

以全国为参照区域,分别将 2000 - 2015 年全国和湖南省的人口数、农业播种面积、GDP、水资源总量、水资源利用量数据分别代入公式(1) ~ (6),计算得出 2000 - 2015 年湖南省相对于全国水资源总量和利用量的人口、农业、GDP 承载力,如图 2 ~ 4 所示。

4.1.1 水资源人口承载力动态变化分析 由图 2 可以看出,水资源利用量人口承载力曲线位于水资源总量人口承载力曲线与实际人口数之间。这说明水资源总量人口承载力和水资源利用量人口承载力都处于富余状态,且水资源利用具有进一步的开发潜力。总的来看,湖南省实际人口呈增长趋势,其中

以 2005 年最低,为 $6\,324.50 \times 10^4$ 人,以 2015 年最高,达 $6\,783.03 \times 10^4$ 人;从水资源利用量人口承载力来看,人口承载力总体略呈下降趋势,其中以 2002 年人口承载力最低,为 $7\,175.90 \times 10^4$ 人,2003 年最高,达 $7\,742.59 \times 10^4$ 人;从水资源总量人口承载潜力来看,人口承载力总体呈大幅度波动态势,其中以 2002 年人口承载力最大,达到 $11\,664.78 \times 10^4$ 人,其次是 2006 年,为 $9\,186.78 \times 10^4$ 人,2011 年最小,只有 $6\,529.23 \times 10^4$ 人。

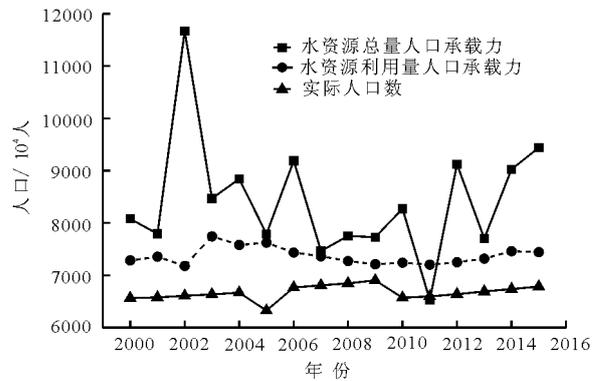


图 2 2000 - 2015 年湖南省相对全国水资源人口承载力

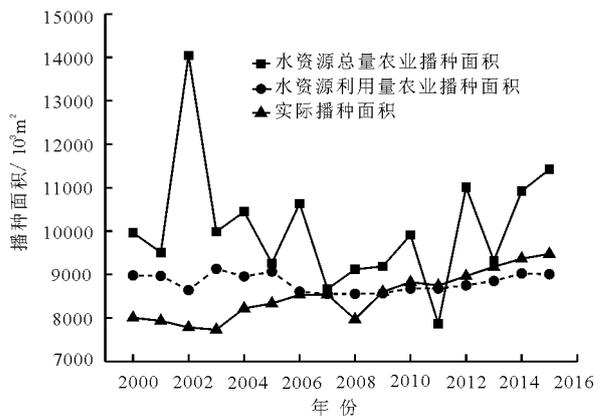


图 3 2000 - 2015 年湖南省相对全国水资源农业承载力

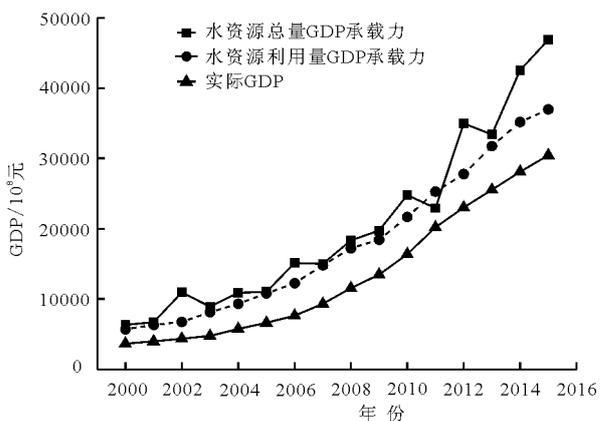


图 4 2000 - 2015 年湖南省相对全国水资源经济承载力

4.1.2 水资源农业承载力动态变化分析 由图 3 可以看出,湖南省实际播种面积总体呈上升趋势,2001-2003 年平稳下降,以 2003 年播种面积最小,为 $7731.24 \times 10^3 \text{ hm}^2$,此后平稳增长(除 2008 年),以 2015 年最大,达 $9474.38 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。而相对水资源总量农业承载力变化曲线高于水资源利用量农业承载力(除 2011 年)。两者的变化趋势分别与水资源总量人口承载力和水资源利用量人口承载力的变化趋势大致相同,从水资源利用量承载力来看,2000-2005 年和 2008 年,水资源承载的播种面积高于实际播种面积,处于富余状态。2006 年、2007 年以及 2009-2011 年,水资源承载的播种面积约等于实际播种面积,处于临界状态;2012-2015 年,实际播种面积大于水资源承载的播种面积,处于超载状态,这表明农业承载力从富余趋向于超载。从水资源总量承载力来看,水资源总量可承载的播种面积基本大于实际播种面积(2011 年除外),均处于富余状态。

4.1.3 水资源经济承载力动态变化分析 湖南省相对水资源经济承载力动态变化(图 4)表明,2000-2015 年湖南省实际 GDP 和水资源利用量 GDP 承载力呈相对光滑“J”字型曲线增长态势,而水资源总量 GDP 承载力呈波动性的“J”字型曲线增长趋势。水资源利用量 GDP 承载力曲线略低于水资源总量 GDP 承载力,高于实际 GDP。湖南省 GDP 由 2000 年的 3645.83×10^8 元增长到 2015 年 23005.52×10^8 元,说明近 10 多年来湖南省经济发展迅速。从水资源利用量 GDP 承载力来看,可承载的 GDP 大于实际 GDP 且具有相同的变化趋势,由 2000 年的 5699.94×10^8 元增长到 2012 年的 27782.29×10^8 元,水资源经济承载力一直处于富余状态,且富余量基本保持稳定。从水资源总量承载力来看,由 2000 年的 6324.48×10^8 元到 2015 年的 46853.81×10^8 元,可承载的 GDP 接近实际 GDP 的 8 倍,处于相当富余状态。这说明相对全国而言,一方面湖南省经济发展水平还比较落后,另一方面湖南省水资源开发利用程度较低。因此,在今后的经济发展中湖南省水资源贡献潜力大。

4.2 水资源承载力空间差异

以湖南省为参照区域,分别将 2000-2015 年湖南省以及各市州的人口数、农业播种面积、GDP、水资源总量、水资源利用量数据分别代入公式(1)~(6),计算可得出 2000-2015 年各市州相对于湖南省水资源总量和利用量(人口、农业、GDP)承载力

(图 5~7)。

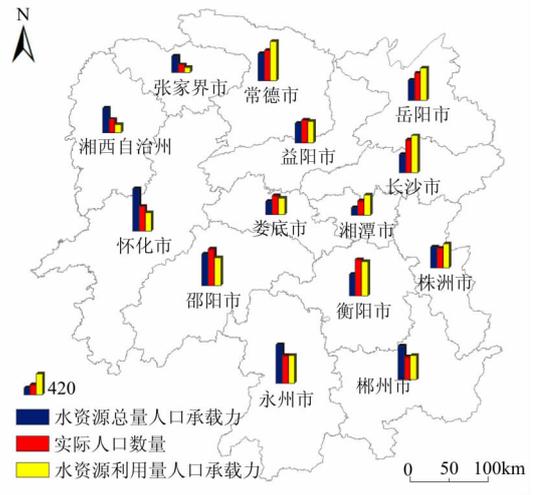


图 5 湖南省人口承载力空间分布图

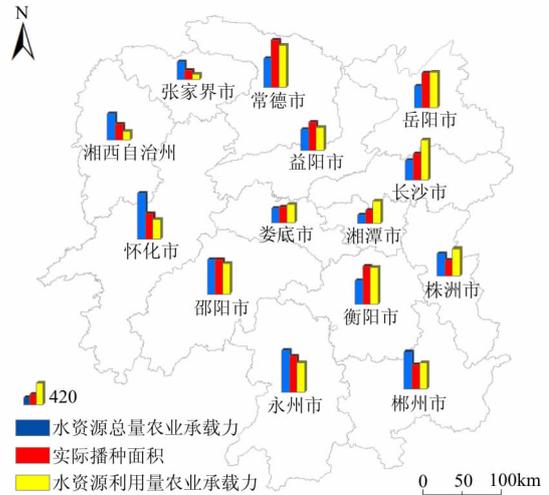


图 6 湖南省农业承载力空间分布图

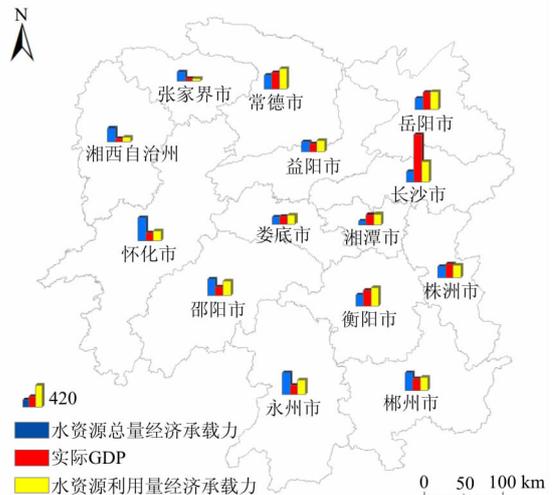


图 7 湖南省 GDP 承载力空间分布图

4.2.1 水资源人口承载力空间差异分析 对湖南省 2000-2015 年各地州市相对水资源人口承载力(图 5)的分析表明,各地州市人口分布差异较明显,人口数最多的是邵阳,达 732.17×10^4 人,最少的是张家界,仅 156.22×10^4 人,邵阳人口密度最大,而张家界最小。湖南省相对水资源总量人口承载力富余由高到低依次为:怀化 > 郴州 > 湘西自治州 > 永州 > 张家界 > 株洲,但是水资源利用量人口承载力超载强度由高到低依次为:邵阳 > 怀化 > 湘西自治州 > 娄底 > 张家界 > 衡阳 > 益阳 > 永州。究其原因,可能是由于邵阳、怀化、湘西自治州等位于湖南省西部与南部山区,虽然水资源总量较丰富,但可利用的水资源占水资源总量比例较小,因而实际的水资源人口承载力小,出现临界状态甚至严重超载。水资源利用量人口富余量由高到低依次为:常德 > 湘潭 > 株洲 > 岳阳 > 长沙 > 郴州,但是水资源总量人口承载力超载强度由高到低依次为:衡阳 > 长沙 > 岳阳 > 娄底 > 湘潭 > 邵阳 > 益阳 > 常德。其原因可能是由于常德、岳阳、长沙等属于湖南省北部、东部及中部等发达地区,相对全省而言,水资源总量较少,但水资源利用程度高,水资源人口承载力处于超载状态,在以后的发展过程中,严格控制人口发展的速度,降低由人口导致的水资源压力。

4.2.2 水资源农业承载力空间差异分析 图 6 为湖南省 2000-2015 年各地州市相对水资源农业承载力分布图。各地州市农业分布差异显著,农业播种面积最多的城市是常德,达 $1\,106.95 \times 10^3 \text{ hm}^2$,最少的城市是张家界,只有 $218.56 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。相对水资源总量农业承载力富余由高到低依次是:怀化 > 郴州 > 湘西自治州 > 张家界 > 株洲 > 永州 > 邵阳,相对水资源利用量农业承载力超载强度由高到低依次为:湘西自治州 > 怀化 > 永州 > 常德 > 益阳 > 邵阳 > 张家界 > 衡阳。这是因为湘西自治州、张家界、怀化等位于湖南省西部与南部山区,虽然水资源总量较丰富,但水资源利用率低,水资源利用量远低于水资源总量。水资源总量农业承载力超载强度由高到低排列的城市依次为:常德 > 衡阳 > 岳阳 > 长沙 > 益阳 > 湘潭 > 娄底,而水资源利用量农业承载力富余量由高到低排列的城市依次为:长沙 > 株洲 > 湘潭市 > 娄底 > 郴州 > 岳阳。这是因为常德、岳阳、益阳等位于湖南省的洞庭湖平原地区,农业发达、经济发展水平较高。而娄底和衡阳位于盆地地区,水资源利用率高。在以后的经济发展过程中,适当调整产业结构的,减少农业对水资源

承载压力,使水资源为农业的发展提供强劲的支持。

4.2.3 水资源经济承载力空间差异分析 图 7 为湖南省 2000-2015 年各地州市相对水资源经济承载力分布图。湖南省实际 GDP 环洞庭湖区、盆地地区较高,长沙最高,其他山区 GDP 比较低。水资源总量 GDP 超载强度由高到低依次依次为:长沙 > 岳阳 > 湘潭 > 衡阳 > 株洲 > 常德 > 娄底,水资源利用量 GDP 超载强度由高到低依次依次为:长沙 > 株洲 > 湘潭。长沙、株洲、湘潭等地区构成湖南省的长株潭经济腹地,经济高度发达,实际 GDP 已经远远超过了当地水资源承载力,水资源承载潜力低,持续下去水资源将会制约经济的发展。水资源总量 GDP 承载力富余由高到低依次依次为:怀化 > 永州 > 湘西自治州 > 邵阳 > 张家界 > 郴州 > 益阳,水资源利用量 GDP 承载力富余由高到低依次依次为:邵阳 > 永州 > 常德 > 益阳 > 衡阳 > 怀化 > 娄底 > 湘西自治州 > 郴州 > 湘潭 > 岳阳 > 张家界。怀化、张家界、湘西自治州等地属于山地地区,经济发展水平较低,而降水丰富,水资源相对其 GDP 来说还有很大的发展空间。此外,这些地州市水资源利用率低于湖南省的平均利用率,水资源经济承载力潜力高。

5 讨论

湖南省水资源以地表水主,而其主要补给来源为大气降水,因此水资源总量与降水量具有显著的相关性(图 8)。湖南省属于亚热带季风区,降水的年际变化量大,2000-2015 年间降水量的最小值为 965.93 mm,而降水量最大值高达 1 828.34 mm。相应的水资源总量也有很大差异,2001 年最少,为 $1\,640.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,2002 年最多,为 $2\,566.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2001 年降水最少,相应的水资源总量人口承载力和农业承载力也非常低(图 2~3)。同时,季风气候降水集中的显著特点,降水年内分配不均匀,造成水资源开发利用上的难度,从而减弱了水资源利用量承载力。

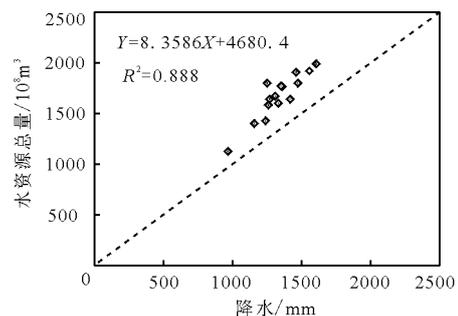


图 8 湖南省水资源总量与 2000-2015 年平均降水量相关性

湖南地势呈“三面环山,北部缺口的马蹄形”,同时受东亚季风和南亚季风的影响,山区多降水,从而省内海拔较高的西部和南部地区水资源承载力较高,而北部洞庭湖区,虽然地表水资源丰富,但是人口众多,工业、农业发达,水资源承载潜力较低。如怀化位于湖南省的西南部,处于东南季风和西南季风的迎风坡,降水最多,而人口密度低、工农业欠发达,因而是水资源人口、农业和GDP承载力潜力最大的市,因此应加大该地区经济和农业建设力度,提高水资源承载力,同时加强蓄水建设,合理调配水资源,缓解其他州市水资源不足的压力。湘潭位于湖南省的中部偏东的湘江边,人口密集、工农业发达,成为水资源人口、农业和GDP承载力最小的市(图5和6),因此该市应注重经济与水资源的协调发展,不能盲目地牺牲水资源来发展经济,加强环保意识和节水意识,并制定节水规划,实行严格的节水制度,提高水资源利用效率,降低用水量,从而减少水资源承载压力。常德地处湘北洞庭湖区平原地区,虽然降水少,但其北临长江,拥有大量客水且湖泊众多,水资源易于调控,可利用的水资源多,是各地州市中水资源人口、农业和GDP承载力最高的市,因此该市应完善水利设施建设,通过维护水系系统,疏通河流,增加水资源容量。虽然张家界位于湖南省的西北地区,虽然降水较多,但是张家界是湖南省典型的岩溶石漠化区,降水很快转入地下河管道排走,水资源开发难度大,可利用的水资源少,因而张家界是水资源人口、农业和GDP承载力最少,在该地区因地制宜修建水库、塘坝等蓄水工程,拦蓄雨季山泉和地表径流,增加水资源可利用量。

6 结 论

本文针对湖南省相对水资源承载力的时空变异研究,以全国为参照区,可以了解到2000-2015年湖南省相对水资源承载力的变化趋势,以湖南省为参照区,可以明确各地州市的相对水资源的空间差异性。通过具体的分析,得出以下结论:

(1)以全国为参照区,从水资源利用量承载力来看,湖南省水资源承载的人口和GDP一直处于双重富余状态,但农业承载力从富余逐渐变为超载。

(2)以湖南省为参照区,从水资源利用量承载力来看,三重富余的城市包括湘潭、岳阳和郴州;人口和农业双重超载,GDP富余的城市包括张家界、湘西自治州、怀化、邵阳、衡阳、益阳和永州;人口和农业双重富余,GDP超载的城市包括长沙和株洲;

人口和GDP富余、农业超载的城市是常德;农业和GDP双重富余、人口超载的城市是娄底。

(3)从水资源承载潜力来看,人口、农业和GDP基本处于三重富余状态,2011年除外,2011年,人口满载,农业超载,GDP富余。三重富余的城市包括湘西自治州、张家界、怀化、永州、郴州;三重超载的城市包括长沙、岳阳、常德、衡阳、娄底和湘潭;人口和农业双重富余,GDP超载的城市是株洲;人口和农业双重超载,GDP富余的城市是益阳和邵阳。

参考文献:

- [1]李智宏. 论水资源可持续利用与水资源管理的重要性[J]. 低碳世界, 2016(12):88-89.
- [2]熊夏澜,林祥海. 基于相对资源法的县域水资源承载力评价[J]. 西北水电, 2015(2):1-4+12.
- [3]李伟,陈雄,聂建超,等. 淮河流域水资源承载力分析[J]. 湖南农业科学, 2013(23):64-67.
- [4]SINGH A. Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(519):1688-1697.
- [5]HADDADIN M J. Water issues in Hashemite jordan[J]. Arab Studies Quarterly, 2000,22(2):63-77.
- [6]新疆水资源软科学课题组. 新疆水资源及其承载力的开发战略对策[J]. 水利水电技术, 1989(6):2-9.
- [7]施雅凤,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [8]许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究:以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993,8(3):229-237.
- [9]朱一中,夏军. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展, 2002,21(2):180-188.
- [10]夏军,张永勇,王中根,等. 城市化地区水资源承载力研究[J]. 水利学报, 2006,37(12):1482-1488.
- [11]段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014,24(s1):119-122.
- [12]李燕,张兴奇. 基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价[J]. 水土保持通报, 2017,37(4):172-178.
- [13]洪振华,童纪新,张奇. 湖南省水资源承载力时空分布评价[J]. 河南科学, 2017,35(2):314-318.
- [14]张琳,张苗. 南水北调江苏受水区水资源承载力研究[J]. 水利科技与经济, 2007,13(3):183-184.
- [15]朱玲燕. 基于系统动力学的典型喀斯特地区水资源承载力评价研究[D]. 重庆:重庆师范大学, 2016.
- [16]徐中民,程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2000,36(2):122-132.

(下转第79页)

- 性能研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版),2017,38(2):28-32.
- [2] 杜世超,任志宇,吴君,等. 镍铁水滑石/还原氧化石墨烯的制备及电催化水氧化性能[J]. 高等学校化学学报,2016,37(8):1415-1420.
- [3] 刘齐鲁. 水滑石的制备和应用综述[J]. 中国非金属矿工业导刊,2017(2):9-11.
- [4] 沙宇,王显妮,张诚,等. 水滑石类材料在水处理中的应用及研究进展[J]. 水处理技术,2007,33(8):1-4.
- [5] 张坤. β -环糊精插层水滑石的制备及其对染料的水处理研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [6] 李子宇. 特殊形貌类水滑石的制备及其电化学应用[D]. 北京:北京化工大学,2014.
- [7] BAGHERI H,HAJIAN A,REZAEI M,ET AL. Composite of Cu metal nanoparticles - multiwall carbon nanotubes - reduced graphene oxide as a novel and high performance platform of the electrochemical sensor for simultaneous determination of nitrite and nitrate[J]. Journal of Hazardous Materials,2017,324(Pt B):762-772.
- [8] REYTER D,BÉLANGER D,ROUÉL. Optimization of the cathode material for nitrate removal by a paired electrolysis process[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,192(2):507-513.
- [9] 李亮,张月陟. 铜电极表面硝酸盐电化学还原机理研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):66-69.
- [10] SCAVETTA E,BALLARIN B,BERRETONI M,et al. Electrochemical sensors based on electrodes modified with synthetic hydrotalcites[J]. Electrochimica Acta,2006,51(11):2129-2134.
- [11] CIRMI D,AYDIN R,KÖLELI F. The electrochemical reduction of nitrate ion on polypyrrole coated copper electrode[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry,2015,736:101-106.
- [12] 李相召,张亚通,张淑亚. 地下水硝酸盐污染的处理技术及研究进展[J]. 技术与市场,2012,19(8):28+30.
- [13] 王颖,曲久辉,刘会娟,等. Pd-Cu/水滑石吸附催化氢还原水中的硝酸根[J]. 科学通报,2006,51(7):786-791.
- [14] 吴旭,谢鲜梅,杜亚丽,等. 水滑石类材料碱性催化性能的应用研究[J]. 应用化工,2005,34(8):469-472.
- [15] 曹明鸣,周维友,仲霞,等. 钴铝类水滑石液相选择性催化甲苯氧化合成苯甲醛[J]. 应用化学,2014,31(5):541-547.
- [16] 杨绍明,江丹,查文玲,等. 基于层层组装钴铝水滑石/聚电解质包裹碳纳米管的无酶葡萄糖传感器[J]. 分析实验室,2012,31(3):18-23.
- [17] REYTER D,BÉLANGER D,ROUÉL. Study of the electroreduction of nitrate on copper in alkaline solution[J]. Electrochimica Acta,2008,53(20):5977-5984.
- [18] ÖZNLÜER T,ÖZDURAK B,DOĞAN H Ö. Electrochemical reduction of nitrate on graphene modified copper electrodes in alkaline media[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry,2013,699(18):1-5.
- [19] PÉREZ-GALLENTE E,FIGUEIREDO M C,KATSOUNAROS I,et al. Electrocatalytic reduction of nitrate on copper single crystals in acidic and alkaline solutions[J]. Electrochimica Acta,2017,227:77-84.
- [20] BONYANI M,MIRZAEI A,LEONARDI S G,et al. Silver nanoparticles/polymethacrylic acid (AgNPs/PMA) hybrid nanocomposites - modified electrodes for the electrochemical detection of nitrate ions[J]. Measurement,2016,84:83-90.

(上接第74页)

- [17] 周亮广,梁虹. 喀斯特地区水资源承载力评价研究——以贵州省为例[J]. 中国岩溶,2006,25(1):23-28.
- [18] 姜秋香,付强,王子龙. 三江平原水资源承载力评价及区域差异[J]. 农业工程学报,2011,27(9):184-190.
- [19] 郑长统,梁虹. 基于人工神经网络的喀斯特地区水资源承载力综合评价——以贵州省为例[J]. 中国岩溶,2010,29(2):170-175.
- [20] 周杨慧,朱红梅,李兰,等. 湖南省相对资源承载力与可持续发展[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版),2008(5):65-68.
- [21] 黄宁生,匡耀求. 广东相对资源承载力与可持续发展问题[J]. 经济地理,2000(2):52-56.
- [22] 张奎. 北京市2003年-2012年相对资源承载力分析[J]. 全国商情(理论研究),2013(20):4-6.
- [23] 白洁,王学恭. 甘肃省相对水资源承载力区域差异分析[J]. 资源开发与市场,2011,27(12):1075-1077.
- [24] YANG Qiyong,ZHANG Fawang,JIANG Zhongcheng,et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China[J]. Environ Earth Sciences,2016,75(1):1-8.
- [25] 王金丽,李锦慧. 湖南省城市水资源承载力评价[J]. 绵阳师范学院学报,2016,35(5):108-111+120.
- [26] 杨奇勇. 湖南省水资源开发利用程度综合评价[D]. 长沙:湖南师范大学,2008.