

云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究

伍文琪^{1, 2} 罗贤^{1, 2} 黄玮³ 李运刚^{1, 21}

(1. 云南大学 亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650091;

2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650091;

3. 云南省气候中心, 云南 昆明 650034)

【摘要】: 水资源承载力是衡量一个地区社会经济发展潜力的重要方面。选取水资源、社会、经济和生态环境评价指标, 构建了区域水资源承载力综合评价模型; 通过分析经济压力指数、人口压力指数、承载压力指数及协调指数, 对云南省水资源的承载能力和利用状况进行评价, 并探讨了其时空分布特征。结果表明: (1) 云南省水资源与生产力布局、人口分布不协调, 滇中地区经济相对发达, 人口数量大, 而水资源量较少, 多属于轻度超载或濒临超载地区; (2) 随着人口增加和经济发展, 区域内水资源承载压力逐渐增大, 如滇东北地区的昭通市由水资源承载适宜地区转变为水资源濒临超载地区, 而滇西部地区的德宏市水资源承载力由承载盈余变为承载适宜; (3) 从整体上看, 目前云南省水资源利用率较低, 工程性缺水问题较为突出。未来水利工程尤其是滇中引水等的建设及运行, 将有效缓解水资源超载问题。

【关键词】: 水资源承载力 综合评价模型 时空分布特征

【中图分类号】: X37 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2018)07-1517-08

水资源是人类社会不可替代的战略资源。随着社会发展和人口剧增, 水资源短缺和水污染问题已成为全球性问题^[1, 2]。解决水资源供需矛盾, 提高水资源利用水平, 实现社会经济、生态环境与水资源可持续发展, 是水资源安全战略研究中的一个重点与热点问题^[3]。水资源承载力是评价一个地区水资源是否安全以及能否支撑社会、经济和生态环境协调发展的重要指标^[4-6]。正确评价水资源承载力及研究其时空变化特征, 有助于合理地利用水资源以及促进区域经济长远、健康发展。

区域水资源复合系统是由社会、经济、生态环境与水资源相耦合构成的复杂巨系统^[7]。在对水资源承载力和利用状况进行评价的过程中, 综合考虑水资源、社会、经济、生态环境及其相互依存、相互作用的关系, 构建水资源承载力综合评价模型, 从而解决以下问题: (1) 区域水资源的承载状态及供需状况; (2) 水资源能够承载的最大经济规模和人口规模; (3) 水资源复合系统的协调发展程度。

目前有关水资源承载力评价的模型种类众多, 计算方法各异, 概括起来主要有 3 类, 即经验公式法、综合评价法和系统分析法^[8]。经验公式法是运用某些经验公式或指标进行计算, 包括背景分析法、常规趋势法和指标计算法^[9]等, 计算相对比较简单, 但对

作者简介: 伍文琪(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail:wq1024@126.com; 罗贤, E-mail:luoxian@ynu.edu.cn

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF201736); 国家自然科学基金项目(41601026, 41661099); 国家重点研发计划项目(2016YFA0601601)。

资源、环境和社会经济之间的联系考虑较少;综合评价法是通过选定的指标与评价标准,并利用一定的方法综合评价水资源承载力,数学理论应用比较深入,但研究中忽略了水资源的系统性,指标选择和评价标准难以统一,常见的综合评价法有模糊综合评价法^[10]和主成分分析法^[3];系统分析法将水资源承载力的主体和客体作为统一整体,综合考虑水资源、社会经济和生态环境的复杂性和系统性,但计算方法复杂,在水资源系统模拟方面仍有缺陷,应用范围有限,目前已有的系统分析法有优化模型法、系统动力学法^[11]等。

本研究综合考虑云南省社会经济发展水平和水资源利用状况,构建区域水资源承载力综合评价模型,研究云南省水资源承载力及其时空分布特征,以期云南省水资源开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

云南省位于我国西南部,地势由西北向东南倾斜。境内河流众多,其中流域面积在 100km² 以上的河流有 908 条,分属于长江、珠江、红河、澜沧江、怒江及伊洛瓦底江等 6 大水系^[12]。该区域总体上属于热带、亚热带高原型季风气候^[13,14]。其多年平均水资源总量为 2210×10⁸m³,人均水资源量接近 5000m³,水资源丰富,仅次于西藏和四川,居全国第 3 位。

由于独特的地形环境和气候条件,云南省水资源时空分布不均^[15]:时间上,雨季 5-10 月径流量约占全年径流量的 72%-85%,旱季 11-次年 4 月径流量仅占全年径流量的 15%-28%;空间上,集中了全省 2/3 的人口和 1/3 的耕地的坝区,其水资源量仅占全省的 5%^[16],而位于云南省中部腹地的滇中地区,其范围包括昆明、曲靖、玉溪、丽江、楚雄、红河、大理 7 个州(市)中的 49 个县(市、区)^[17],人均水资源量仅有 700m³。省内大部分区域水利基础薄弱,水资源开发利用难度大、成本高^[18]。2000-2016 年,云南省最大水资源利用率为 2011 年 9.9%,远低于全国平均水平。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究所采用数据包括社会、经济、生态环境及水资源利用等基础数据。主要来源于云南省及州市统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报、水资源公报、农业年鉴和水利统计年鉴等。

2.2 水资源承载力综合评价模型

2.2.1 指标体系设计

指标体系是评价水资源复合系统协调发展程度的重要依据和标准^[7]。评价结果的可靠性与指标体系的科学与否直接相关。水资源承载力评价指标的选择应基于科学性、整体性、动态变化性及可操作性等基本原則^[19]。

根据上述原则,在已有研究的基础上^[20-23],综合考虑云南省水资源利用水平和社会经济发展状况,建立云南省水资源、社会、经济与生态环境复合系统评价指标体系,分为 5 个目标层,共 20 个评价指标(表 1),以对云南省 16 个州市的水资源承载力及其时空变化进行分析评价。

表 1 云南省水资源承载力综合评价指标体系

| 目标层 | 指标 | 计算方法 | 作用 |
|-----|-------------|---|----------|
| | 单位面积水资源量 D1 | 当地水资源量/国土面积 (10 ⁴ m ³ / km ²) | 反映水资源量大小 |

| | | | | | |
|----------------|-------------|---|---|------------------------------|-----------------|
| 承载力指数 | 水资源系统指标 S1 | 水资源开发利用率 D2 | 河道外供水量/水资源总量 (%) | 反映水资源开发及利用程度 | |
| | | 人均水资源量 D3 | 当地水资源量/总人口 (m ³ /人) | 反映水资源丰、缺状态 | |
| | | 供水模数 D4 | 供水量/国土面积 (10 ⁴ m ³ /km ²) | 反映单位面积供水保障程度 | |
| | 社会系统指标 S2 | 人均库容量 D5 | 总库容量/总人口 (m ³ /人) | 反映区域蓄水能力 | |
| | | 人口密度 D6 | 总人口/国土面积 (人/km ²) | 反映人口压力 | |
| | | 城市化水平 D7 | 城镇人口/总人口 (%) | 反映社会发展水平与人口素质 | |
| | 经济系统指标 S3 | 生活用水定额 D8 | 生活用水量/总人口/365[m ³ /(d·人)] | 反映人口素质与节水状况 | |
| | | 人均 GDP D9 | gdp 总量/总人口 (10 ⁴ 元/人) | 反映区域整体经济状况 | |
| | | 经济密度 D10 | GDP 总量/国土面积 (10 ⁴ 元/km ²) | 反映区域经济发展水平 | |
| | 生态环境系统指标 S4 | 农业产值密度 D11 | 农业 GDP 总量/国土面积 (10 ⁴ 元/km ²) | 反映区域农业发展水平 | |
| | | 农民人均纯收入 D12 | 农民纯收入/农业人口 (10 ⁴ 元/人) | 反映农民收入水平 | |
| | | 生态环境用水率 D13 | 生态环境用水量/当地水资源量 (%) | 反映生态系统对水资源的需求 | |
| | | 工业废水排放达标率 D14 | 废水达标排放量/废水总量 (%) | 反映工业节水水平 | |
| | 协调指数 | 协调系统指标 S5 | 工业用水重复利用率 D15 | 重复用水量/总用水量 (%) | 反映工业用水水平 |
| | | | 人均用水量 D16 | 用水总量/总人口 (m ³ /人) | 反映区域人口生产、生活用水水平 |
| 单位耗水生产 GDP D17 | | GDP 总量/总用水量 (10 ⁴ 元/m ³) | 水资源与经济发展协调性度量 | | |
| 单位面积粮食产量 D18 | | 粮食总产量/粮食播种面积 (t/hm ²) | 反映区域农业生产与水资源的协调性关系 | | |
| 农田亩均用水量 D19 | | 统计数据 (m ³) | 反映作物对水的依赖状况及节水水平 | | |
| | | 人均有效灌溉面积 D20 | 有效灌溉面积/总人口 (hm ² /人) | 反映农业用水水平 | |

2.2.2 模型构建

为了定量分析水资源承载力的大小,本研究从经济压力、人口压力、承载压力以及协调水平四个方面考虑,构建区域水资源承载力综合评价模型,其计算公式为^[20]:

$$CI = \sqrt[3]{(\alpha E_p I + \beta P_p I) \times C_p I \times HI} \quad (1)$$

式中:CI 为区域水资源承载力综合评价指数;E_pI、P_pI 分别为经济压力指数和人口压力指数;α、β 为经济压力指数和人口压力指数的影响权重,本研究中,α、β 取同等权重 0.5^[20];C_pI、HI 分别为承载压力指数和协调指数。

综合评价指数 CI 是反映区域内水资源承载状态的指标。参考文献^[20],确定综合评价指数分级标准(表 2)。

表 2 区域水资源承载力综合评价指数分级标准

| CI | 0.00-0.20 | 0.21-0.40 | 0.41-0.70 | 0.71-1.00 | >1.00 |
|------|-----------|-----------|------------|-----------|---------|
| 承载等级 | 承载盈余 | 承载适宜 | 濒临超载 | 轻度超载 | 严重超载 |
| 承载状态 | 水资源丰裕 | 水资源利用协调 | 水资源利用轻度不协调 | 水资源短缺 | 水资源严重缺乏 |

(1) 经济压力指数

经济压力指数 $E_p I$ 描述的是区域内经济发展给水资源带来的压力, 其计算公式为:

$$E_p I = \frac{GDP}{E_m} \quad (2)$$

式中: GDP 为当前的国内经济规模; E_m 为水资源能够承载的最大经济规模, 其计算公式为^[7]:

$$E_m = \frac{GDP_d}{W} \times W_u \quad (3)$$

式中: GDP_d 为用水为 W 时的经济规模; W 为社会经济系统总用水量; W_u 为可利用水资源量, 其计算公式为:

$$W_u = W_1 + W_2 - W_{12} \quad (4)$$

式中: W_1 、 W_2 分别为地表和地下浅层可利用水资源量; W_{12} 为重复计算量。

(2) 人口压力指数

人口压力指数 $P_p I$ 反映区域内人口增长给水资源带来的压力, 其计算公式为:

$$P_p I = \frac{P}{P_m} \quad (5)$$

式中: P 为当前人口数量; P_m 为水资源能够承载的最大人口数量, 其计算公式为^[7]:

$$P_m = \frac{GDP}{GDP_c} \quad (6)$$

式中: GDP_c 为某一社会阶段人均 GDP 的下限阈值。

(3) 承载压力指数及协调指数

承载压力指数 $C_p I$ 描述的是区域内水资源复合系统发展所承载的压力, 计算公式为:

$$C_p I = \frac{PI}{SI} \quad (7)$$

式中: PI 、 SI 分别表示水资源复合系统的压力指数和支持力指数。

支持力指数计算公式为:

$$SI = \sum_i^n S_i Y_i \quad (8)$$

式中: S_i 、 Y_i 分别表示水资源系统中第 i 项指标的权重与标准化值; n 为指标数。

压力指数计算公式为:

$$PI = \sum_i^n P_i Y_i \quad (9)$$

式中: P_i 、 Y_i 分别表示社会、经济和生态环境系统中第 i 项指标的权重与标准化值; n 为指标数。

协调指数体现区域内水资源复合系统总体协调水平,是反映区域生产、生活用水水平的指标,其计算公式为:

$$HI = \sum_i^n W_i Y_i \quad (10)$$

式中: W_i 、 Y_i 分别表示协调系统中第 i 项指标的权重与标准化值; n 为指标数。

本研究选用水资源系统 S_1 计算支持力指数,选取社会系统 S_2 、经济系统 S_3 和生态环境系统 S_4 计算压力指数,选择协调系统 S_5 计算协调指数。对水资源复合系统数据进行标准化处理后,再采用熵值法确定各指标的权重,最后得到各层指标的综合评价值。

3 结果与分析

为研究不同社会经济发展水平下水资源承载力动态变化情况,结合已有水资源及社会经济数据,选取 2000、2007 和 2015 等 3 个平水年,运用水资源承载力综合评价模型,对云南省水资源承载力及其时空分布特征进行分析。

3.1 经济压力指数与人口压力指数分析

云南省 2015 年水资源复合系统经济压力指数和人口压力指数如图 1 所示。由图可知,云南省水资源承载经济压力程度和人口压力程度分布的地区基本一致,但水资源地区分布与生产力布局和人口分布不相匹配。滇中地区的昆明、楚雄、大理和曲靖由于水资源量偏少,同时社会经济发展快,人口数量大,水资源供需矛盾加剧,导致了水资源所承载的经济压力和人口压力大。如 2015 年昆明人均 GDP 达 59428 元,人口密度为 318 人/ km^2 ,分别远远超过该年云南省人均 GDP28722 元和平均人口密度 124 人/ km^2 ,而昆明人均水资源量仅有 995 m^3 ,远低于云南省人均水资源量 3948 m^3 。

滇西北地区的迪庆州及怒江州,地形地貌复杂,处于横断山脉和青藏高原交界处,海拔落差巨大,横亘怒江与金沙江,水量较为丰富,而经济发展较慢,人口密度较低,每平方千米不足 40 人,区域水资源承载经济压力和人口压力都比较小。

3.2 承载压力指数分析

云南省 2000 年和 2015 年水资源复合系统承载压力指数如图 2 所示。从空间分布上看,滇中地区的昆明市和玉溪市承载压力指数 $C_pI > 1$, 说明该地区的社会经济发展压力已超出了其水资源的承载范围。而滇西北、滇西南和南部地区由于水资源丰富, 经济发展相对落后, 承载压力指数 C_pI 均小于 0.70, 表明该部分地区社会经济发展对水资源压力较小。如滇西南的普洱市, 2015 年水资源总量为 $290.9 \times 10^8 \text{m}^3$, 居云南省首位, 而经济密度和农业产值密度分别为 116 和 55 元/ km^2 , 远远低于云南省平均水平。

从时间变化上看, 滇中地区的大理和楚雄水资源承载的压力明显增大, 2000 年其承载压力指数 C_pI 均在 0.71 至 1.00 之间, 2015 年其 C_pI 超过了 1.00, 说明该地区水资源承载的社会经济发展和生态环境保护压力已经超过了其所承载的支持力。随着人民生活水平不断提高和城市化进程日益加快, 滇中地区水资源承载的压力逐渐增大, 水资源供需矛盾日益突出。如 2000 年大理州人均 GDP 仅 4098 元, 城市化水平为 18.9%, 远低于全省平均水平, 而 2015 年人均 GDP 达 25398 元, 城市化水平为 42.2%, 接近全省平均水平, 水资源承载压力增大。

3.3 协调指数分析

云南省 2000 年和 2015 年水资源复合系统协调指数如图 3 所示。从图中可以看出, 云南省大部分地区协调指数 HI 呈明显增大趋势, 表明水利工程的建设增强了云南省的水资源利用能力, 使区域内水资源复合系统总体协调水平不断提高。滇中地区的昆明市和曲靖市随着农业加快发展, 用水量迅速增长, 水资源供需不平衡, 为了解决农业用水需要, 该区域加大灌区配套和节水改造投入, 改进农业灌溉方式, 完善水利基础设施建设, 提高了水资源利用水平。如 2000 年曲靖市农田亩均用水量为 437m^3 , 水量消耗大, 水资源利用效率不高, 而 2015 年仅 305m^3 , 较 2000 年减少了 30.2%, 同时远低于 2015 年全省平均水平 398m^3 , 水资源利用能力明显增强。

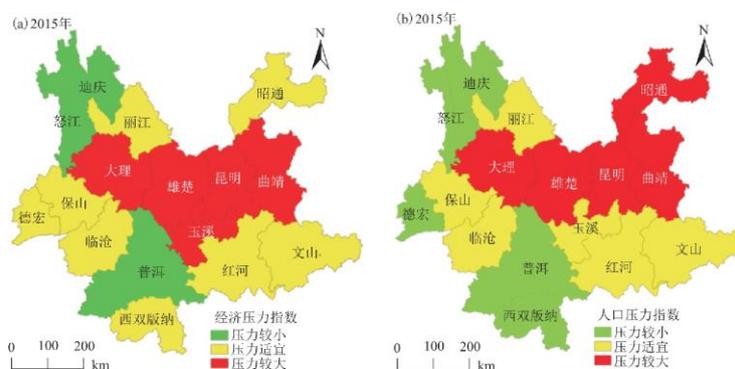


图 12015 年云南省水资源承载经济压力指数(a)和人口压力指数

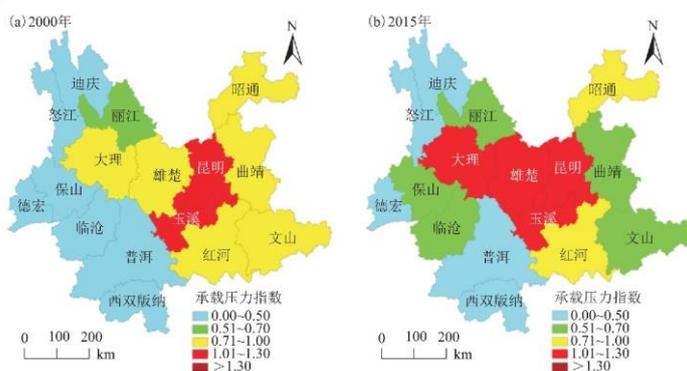


图 2 云南省水资源复合系统承载压力指数

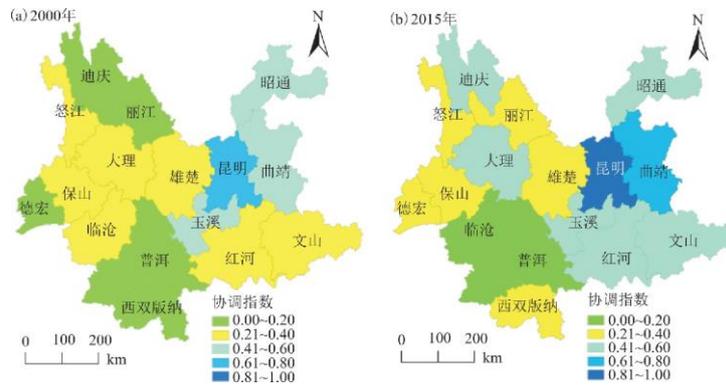


图 3 云南省水资源复合系统协调指数

3.4 综合评价指数分析

云南省水资源承载力综合评价指数如图 4 所示。结合表 2 综合评价指数 CI 的分级标准,从图中可以看出,空间上,云南省水资源地区分布不均,水资源供需矛盾突出。滇中地区人口集中,经济发展快,而水资源量偏少,水资源利用轻度不协调,属于水资源承载力濒临超载地区,水资源面临的形势非常严峻,尤其昆明市的水资源开发利用已经超过水资源的承载能力,出现水资源短缺现象,属于水资源轻度超载地区,水资源问题已成为滇中可持续发展的制约性因素;而滇西北、滇西南地区的怒江州、迪庆州和普洱市,经济发展较慢,人口较少,水资源充裕,属于水资源承载盈余地区;其他大部分地区社会经济发展与水资源利用相协调,属于水资源承载适宜地区,区域内水资源承载压力较小。

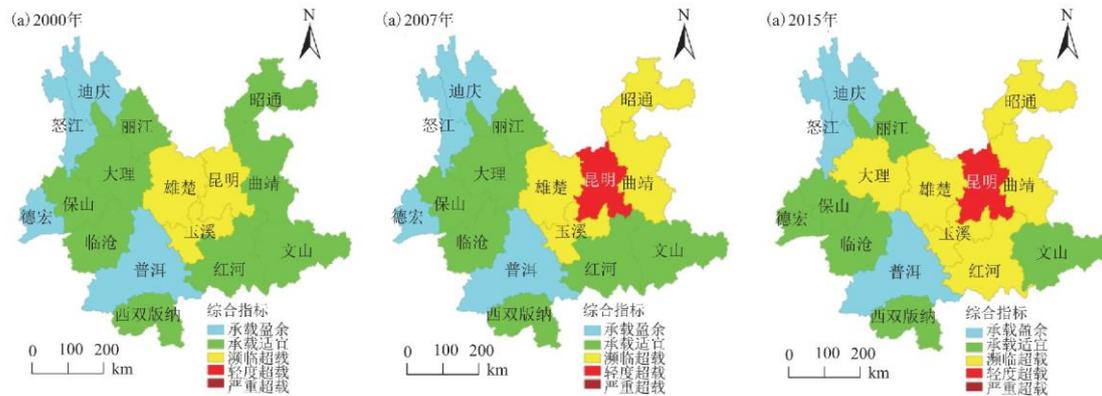


图 4 云南省水资源承载力综合评价指数

从时间变化上来看,区域内水资源承载压力逐渐增大。滇东北地区的昭通市和滇中的曲靖市、大理州、红河州等大部分地区由水资源承载适宜地区变为水资源濒临超载地区,水资源利用出现轻度不协调现象,尤其滇中地区的昆明市水资源紧缺,已变成水资源轻度超载地区;滇西部地区的德宏市水资源承载压力加大,由水资源承载盈余地区变为水资源承载适宜地区。

4 结论与建议

本文利用 2000、2007 和 2015 等 3 个平水年的水资源及社会经济数据,通过构建区域水资源承载力综合评价模型,对云南省水资源承载力的时空变化特征进行了研究,结果表明:

(1)空间上,云南省水资源地区分布不均,且与生产力布局及人口分布不相匹配,水资源供需不平衡。滇中地区经济发达,人口数量大,而水资源量偏少,大都属于水资源承载力濒临超载地区;滇西北和滇西南地区经济相对落后,人口密度较小,水资源丰裕,属于水资源承载盈余地区;其他大部分地区水资源利用协调,属于水资源承载适宜地区。

(2)时间上,随着人口快速增长和经济不断发展,区域内水资源承载社会经济发展压力逐渐增大。滇东北和滇中大部分地区由水资源承载适宜地区变成水资源濒临超载地区,尤其滇中地区的昆明市,已变为水资源轻度超载地区;滇西部地区的德宏市水资源承载压力加大,由水资源承载盈余地区变为水资源承载适宜地区。

(3)从整体上看,目前云南省水资源利用水平较低,大部分区域水利基础仍十分薄弱,工程性缺水问题较为突出。

作为云南省经济相对发达的滇中地区,水资源超载现象日益严重,应加强水资源的高效利用,另一方面,未来滇中引水工程的建设及运行,预计将有效缓解滇中地区水资源超载问题;而云南省东北地区水资源利用已濒临超载,应新建和扩建蓄水工程,提高渠系利用系数,改变传统灌溉方式;云南省西北地区水资源承载盈余,由于地形地貌条件复杂,应加强水资源和生态环境的保护,加大坡耕地水土流失治理,实现水资源与社会经济的可持续发展。

参考文献:

[1]DAVIJANI M H, BANIHABIB M E, ANVAR A N, et al.Multi-objective optimization model for the allocation of water resources in arid regions based on the maximization of socioeconomic efficiency[J]. Water Resources Management, 2016, 30 (3) :1-20.

[2]SALMIVAARA A, PORKKA M, KUMMU M, et al.Exploring the modifiable areal unit problem in spatial water assessments:a case of water shortage in Monsoon Asia[J].Water, 2015, 7 (3) :898-917.

[3]许朗,黄莺,刘爱军.基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(12):1468-1474.

[4]KOLASA-WIECEK A.Exploitation of water resources of the opole province-forecasting with the use of artificial neural networks[J].Ecological Chemistry and Engineering S, 2010, 17 (3) :363-371.

[5]AKO A A, EYONG G E T, NKENG G E.Water resources management and integrated water resources management (IWRM) in Cameroon[J].Water Resources Management, 2010, 24 (5) :871-888.

[6]邹进,张友权,潘锋.基于二元水循环理论的水资源承载力质量能综合评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(1):117-123.

[7]王友贞,施国庆,王德胜.区域水资源承载力评价指标体系的研究[J].自然资源学报,2005,20(4):597-604.

[8]左其亭.水资源承载力研究方法总结与再思考[J].水利水电科技进展,2017,37(3):1-6.

[9]惠洪河,蒋晓辉,黄强,等.水资源承载力评价指标体系研究[J].水土保持通报,2001(1):30-34.

-
- [10] 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.
- [11] 黄庆旭, 何春阳, 史培军, 等. 气候干旱和经济发展双重压力下的北京水资源承载力变化情景模拟研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5):859-870.
- [12] 张先起, 刘慧卿. 云南省水资源基本状况及供需水预测研究[J]. 人民长江, 2008(12):30-32.
- [13] LI Y G, HE D M, HU J M, et al. Variability of extreme precipitation over Yunnan Province, China 1960-2012[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(2):245-258.
- [14] 何娇楠, 李运刚, 李雪, 等. 云南省 1961-2012 年干旱时空变化特征[J]. 山地学报, 2016, 34(1):19-27.
- [15] 王树鹏, 张云峰, 李中华. 云南省节约用水现状及发展对策探析[J]. 中国农村水利水电, 2012(5):15-17.
- [16] 郭倩, 汪嘉杨, 张碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3):484-493.
- [17] 瞿霜菊, 黄辉, 曹正浩, 等. 云南省滇中引水工程规划研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10):80-83.
- [18] 杜娟, 骆华松, 胡志丁. 云南省水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2010(1):46-50.
- [19] 夏军, 李原园, 傅国斌, 等. 气候变化影响下中国水资源的脆弱性与适应对策[M]. 北京:科学出版社, 2016:28-30.
- [20] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011(2):258-269.
- [21] 许玲燕, 杜建国, 刘高峰. 基于云模型的太湖流域农村水环境承载力动态变化特征分析——以太湖流域镇江区域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(03):445-453.
- [22] 马海良, 施陈玲, 王蕾. 城镇化进程中的江苏水资源承载力研究——基于组合赋权和升半 Γ 型分布函数[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11):1697-1703.
- [23] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. “一带一路”中国大陆区水资源特征及支撑能力研究[J]. 水利学报, 2017(6):1-8.