

水资源承载力评价方法初探以及在“以水四定”中的运用

宋志^{1,2}, 乐琪浪², 陈绪钰^{1,2}, 杨楠³, 黄天驹⁴

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国地质调查局, 北京 100037; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要:在水资源趋紧和水需求增长的背景下,水成为经济发展的约束资源,亟待“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”,把水资源作为最大的刚性约束,推动用水方式由粗放向节约集约转变。为将“以水四定”与农业、生活、工业、城镇发展相对应,本文将“地、人、产、城”分别定义为耕地面积、人口规模、工业增加值总量、城镇建设占用面积。在此基础上,初步探索了水资源承载力评价方法,引入了“综合定额”的概念,力求揭示耕地与主要农作物、工业与耗水行业的内在联系与计算规则。通过全国31个省区市的评价结果显示,浪费情景处于超载,节约情景有较大盈余,倒逼节水行动。在水资源承载最大规模下,全国仍有超载区,耕地超载呈中部“塌陷”,人口超载呈环状“倒塌”,工业超载呈区域性“沦陷”,城镇用地超载呈沿海少点“亏空”,该区域需要从水资源总量、结构、效率等方面提升承载规模。

关键词:水资源承载力;以水定人;以水定地;以水定产;以水定城

中图分类号:P694

文献标识码:A

1 引言

水资源承载规模是指某一地区的水资源最大可承载的农业、工业、城市规模和人口的能力,是随着经济社会发展而变化的综合目标^[1-2]。从资源环境承载能力上,一般由水、土两种资源约束社会经济发展。相关文献资料显示^[3-4],我国城市农业、城镇建设等承载规模80%以上多为水约束,尤其在宁夏、河北等地的缺水城市均由水条件直接控制规模。随着未来经济社会快速发展,城市用水需求呈刚性增长,水资源面临更加严峻的形势。

在水资源趋紧和需水增长的背景下,水成为发展的约束资源,亟待“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”,把水资源作为最大的刚性约束,推动用水方式由粗放向节约集约转变。如何优化水资源的国土空间布局,合理控制并科学规划农业、生活、工业、城镇等发展,成为当前高质量发展背景下亟待解决的现实问题。

2 国内外研究现状

我国水资源承载力开始于上世纪80年代的西北干旱区水资源研究,经历了理论探索、模型构建等阶段,发展到现今的应用阶段。关于“水资源承载力”的定义,不同学者提出了不同的表述,但基本都强调了“支撑能力”的概念,具有代表性的定义有:最大可承载容纳的农业、工业、城市规模、人口的能力^[5];水资源对该地区社会经济最大支撑能力^[6-8];该地区人口增长与经济发展的最大容量^[9-10];供水量能支撑人口、环境与经济协调发展的能力^[11]等。水资源承载规模的研究内容,分为人口规模^[12]、GDP总值规模^[13]、第一、二、三GDP规模^[14]、城市用地规模^[15]或者多个指标^[16]。可以看出,水资源承载力概念涵盖了资源禀赋、社会经济技术发展、人口支撑、生态环境保障等,不仅有自然属性,还有经济、社会、文化、传统的影响。指标体系是水资源承载力研究的基础性工作,也是承载结果科学性的关键环节。当前国内外水资源指标体

收稿日期:2020-10-10; 改回日期:2020-12-08

作者简介:宋志(1982—),男,高级工程师,主要从事国土空间规划和环境地质研究。E-mail:35842126@qq.com

资助项目:中国地质调查局.成都多要素城市地质调查(编号:DD20189210)

系大致分为 4 类,分别为水资源系统指标、社会系统指标、经济系统指标、生态环境系统指标。水资源指标多为资源禀赋刻画,如单位面积水资源量^[17]、水资源可开发利用率^[18]、水资源变差系数等。社会指标多为人口、生活方面的现状,如人口密度、人口城镇化率、生活用水定额等。经济指标多为 GDP 以及相关效率指标,如 GDP 增长率、工业用水重复利用率、灌溉覆盖率。生态环境指标多为水污染、植被等。

综上所述,关于水资源承载力研究内容相关成果较为成熟,但也存在内涵宏观、涉及面广、定义模糊、耦合关系不足、量化指标不够精细等问题。水资源承载力指标体系基本找出了与水有关的要素,但是普遍缺少水平衡的精确刻画,基本没有考虑水消耗中的关键影响因素,使得指标繁而杂,耦合结果往往缺乏真实性和有效性。为此,本文试图揭示水资源承载评价中的主控因子以及计算规则,建立

基于“以水四定”的水资源承载能力评价方法,并以全国 31 个省区市为例,评价水条件下“地、人、产、城”的承载状态,提出相关优化和提升建议。

3 评价方法

3.1 定义

“以水四定”分别指以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”,是与城市、用地、人口、经济密切相关。结合水资源承载能力的功能指向,本文定义“城”为建设用地,计算水资源承载的城市发展的用地规模,“地”为耕地,计算水资源承载的耕地规模,“人”为城市人口,计算水资源承载的合理人口规模,“产”为工业增加值,计算水资源承载的工业增加值规模,见表 1。通过“以水四定”承载对象的定义,基本满足高质量发展背景下农业、生活、工业、城镇等合理控制与科学规划。

表 1 “以水四定”类型表

Table 1 Four factors related to the development of a region should be determined by water resources

序号	名称	定义	意义
1	以水定地	耕地	水可承载农业生产合理规模
2	以水定人	人口	水可承载人口生活合理规模
3	以水定产	工业增加值	水可承载工业发展合理规模
4	以水定城	建设用地	水可承载城镇建设合理规模

3.2 以水定地

水资源可承载的耕地规模包括可承载的灌溉耕地面积和单纯以天然降水为水源的耕地面积(雨养耕地面积),可用式(1)表示。

$$S_{地} = S_{灌溉} + S_{雨养} \quad (1)$$

式中: $S_{地}$ 为水资源可承载的耕地面积; $S_{灌溉}$ 为可承载的灌溉耕地面积; $S_{雨养}$ 为雨养耕地面积。

可承载灌溉耕地灌溉可用水量和农田综合灌溉定额的比值,见式(2)。灌溉用水量可根据红线用水量和现状农业用水结构确定。农田灌溉定额根据各县市实际农业播种面积大于 80% 的主要农作物、各农作物的灌溉定额进行加权确定。在此基础上,叠加复种指数、农田灌溉水有效利用系数等确定农田灌综合灌溉定额。

$$S_{灌溉} = \frac{W_{农业用水}}{F_{复种指数} \times D_{灌溉综合定额}} \quad (2)$$

$$D_{灌溉综合定额} = \sum_{n=1}^{种植结构大于80\%数量} B_{主要农作物占比} \times D_{主要农作物灌溉定额} \quad (3)$$

式中: $W_{农业用水}$ 为农业用水量; $F_{复种指数}$ 为复种指

数,可为播种面积除以耕地面积; $B_{主要农作物占比}$ 为主要农作物播种面积占比; $D_{主要农作物灌溉定额}$ 为农作物的灌溉定额,可参考各省用水定额标准。

雨养耕地面积:根据实际情况,在资料充足、小尺度区域利用彭曼公式、SCS 模型计算;在资料难以获取、大尺度区域考虑降雨量分布、旱地类型综合确定。

“以水定地”涉及的主要资料为用水定额(行业用水定额、灌溉用水定额)、水资源公报、农业公报、水利普查公报、水利统计年鉴等。在“以水定地”中,主要农作物的灌溉定额为区间值,从而得到水资源承载耕地的低值与高值 2 种情景。

3.3 以水定人

水资源承载的人口规模可用生活用水量与居民生活用水标准的比值,见式(4)。生活用水量可根据红线用水量与现状生活用水结构确定。居民生活用水标准可根据《室内给水设计规范》中的居民生活用水定额,分为三区,特大、大、中小城市,低、高区间用水值。

$$N_{\text{水资源承载人口规模}} = \frac{W_{\text{生活用水}}}{S_{\text{居民生活用水标准}}} \quad (4)$$

式中: $N_{\text{水资源承载人口规模}}$ 为水资源可承载的人口规模; $W_{\text{生活用水}}$ 为生活用水量; $S_{\text{居民生活用水标准}}$ 为居民生活用水标准。

“以水定人”涉及的主要资料为居民生活用水定额、水资源公报、水利普查公报、水利统计年鉴等。在“以水定人”中,居民生活用水量分为低、高值,从而得到水资源承载人口规模的低值与高值 2 种情景,分别代表粗放浪费下与节约用水条件下的人口规模。

3.4 以水定产

工业增加值是工业企业生产过程中新增加的价值,是国民经济核算的一项基础指标。水资源承载的工业增加值可为工业用水量与工业增加值综合用水定额的比值,见式(5)。生活用水量可根据红线用水量与现状工业用水结构确定。工业增加值综合用水定额为八大耗水行业(火电、化工、造纸、冶金、纺织、建材、食品、机械)和其他工业的经济总量占比与各工业万元增加值用水量的乘积的加权和,见式 6。

$$N_{\text{水资源承载工业增加值}} = \frac{W_{\text{工业用水}}}{S_{\text{工业增加值综合用水定额}}} \quad (5)$$

式中, $N_{\text{水资源承载工业增加值}}$ 为水资源承载的工业增加值; $W_{\text{工业用水}}$ 为工业用水量; $S_{\text{工业增加值综合用水定额}}$ 为万元工业增加值综合用水定额。

$$S_{\text{工业增加值综合用水定额}} = \sum_{n=9}^{n=9} \text{八大耗水与其他工业} B_{\text{各工业经济总量占比}} \times D_{\text{各工业万元增加值用水量}} \quad (6)$$

式中, $B_{\text{各工业经济总量占比}}$ 为各工业经济总量占比; $D_{\text{各工业万元增加值用水量}}$ 为八大耗水与其他工业万元增加值用水量。

“以水定产”涉及的主要资料为统计年鉴、水资源公报、节水公报、中国工业统计年鉴等。

3.5 以水定城

水资源承载城镇建设用地可概略分为水资源承载生活用地和水资源承载工业用地,见式(7)。水资源承载的生活用地可为前述水资源承载人口规模与人均城乡用地(现状、国际标准)的乘积,见式(8)。水资源承载工业用地可为前述水资源承载工业增加值与工业用地产出强度的比值,见式(9)。

$$D_{\text{城镇建设用地}} = D_{\text{水资源承载生活用地}} + D_{\text{水资源承载工业用地}} \quad (7)$$

式中, $D_{\text{城镇建设用地}}$ 为水资源承载城镇建设用地; $D_{\text{水资源承载生活用地}}$ 为水资源承载的生活用地; $D_{\text{水资源承载工业用地}}$ 为水资源承载的工业用地。

$$D_{\text{水资源承载生活用地}} = N_{\text{水资源承载人口规模}} \times R_{\text{人均城乡用地(现状、国际标准)}} \quad (8)$$

式中, $N_{\text{水资源承载人口规模}}$ 为水资源承载的人口规模,即“以水定人”的人口规模; $R_{\text{人均城乡用地}}$ 为人均城乡用地,分为现状与国际标准 2 个标准。

$$D_{\text{水资源承载工业用地}} = \frac{N_{\text{水资源承载工业增加值}}}{R_{\text{工业用地产出强度}}} \quad (9)$$

式中, $N_{\text{水资源承载工业增加值}}$ 为水资源承载工业增加值,即“以水定产”的工业增加值; $R_{\text{工业用地产出强度}}$ 为工业用地产出强度。

“以水定城”涉及的主要资料为统计年鉴、水资源公报等。在“以水定城”中,人口规模分为出人口的低、高值。人均城乡用地规模是根据人均国际用地标准、人均用地现状得出,从而分为人均城乡用地的低、高值。各情景表示如下:

情景 1:用水定额高值(人少) × 人均国际用地标准(地少),称为水费地节。

情景 2:用水定额低值(人多) × 人均国际用地标准(地少),称为水节地节。

情景 3:用水定额高值(人少) × 人均用地现状(地多),称为水费地费。

情景 4:用水定额低值(人多) × 人均用地现状(地多),称为水节地费。

其中,人均国际标准是国际普遍公认的节约用地面积,为 125m²/人,而中国的现状用地标准为 264 m²/人,是国际标准的 2.11 倍,目前处于粗放利用,但有较大节约空间。

“以水四定”评价体系涉及的评价因子见图 1。

4 评价结果

基于水资源承载规模的评价方法体系,在充分收集相关公报、年鉴等资料基础上,对全国 31 个省开展了“以水四定”,初步评价结果如下:

从“以水定地”上,全国水资源承载耕地为 19.52 ~ 22.89 亿亩,对比耕地现状,在粗放浪费情景下(水资源承载耕地低值),全国耕地处于超载状态,超载面积为 2.56 亿亩,在节约用水情景下(水资源承载耕地高值),全国耕地处于盈余状态,盈余面积达 3.37 亿亩。河南、内蒙古等 16 个省市在水资源承载最大耕地规模下,仍处于超载状态,呈中

部“塌陷”,建议针对以上区域优化农业用水结构、提高有效灌溉系数、实施调水工程等方式提升水资源承载耕地能力。



图1 以水四定主要评价因子

Fig. 1 Main factors in the evaluating process of water resources in a region

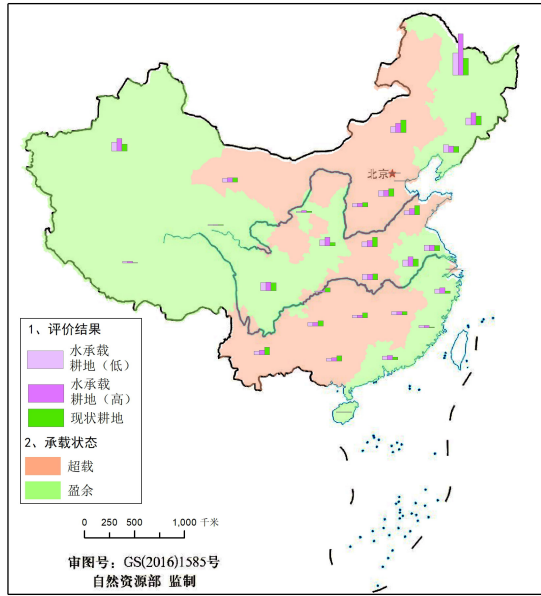


图2 水资源承载耕地评价结果图

Fig. 2 The evaluating diagram of China showing water resources' carrying capacity for cultivation

从“以水定人”上,全国水资源承载人口规模为9.83~15.90亿人,对比现状人口,在粗放浪费情景下(水资源承载人口低值),全国人口规模处于超载状态,超载3.99亿人,在节约用水情景下(水资源承载人口高值),全国人口规模处于盈余状态,盈余2.08亿人。安徽、山东等12个省市在当前节约用水情景下,仍处于超载状态,呈环状“倒塌”,建议针对以上区域优化生活用水结构,实施节约用水措施,提高生活用水总量等方式提升水资源承载人口规模能力。

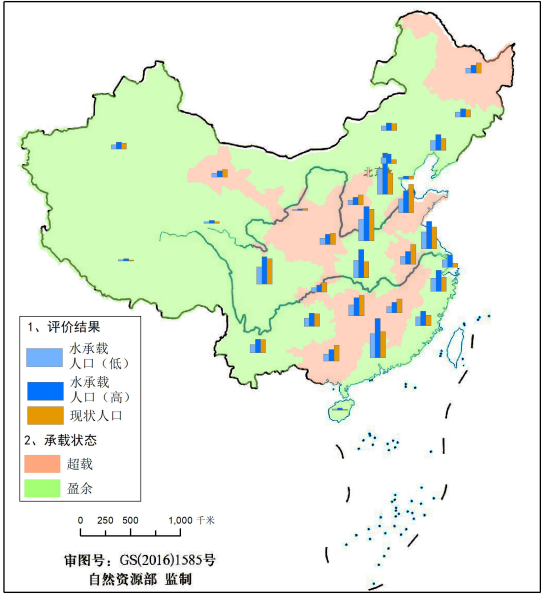


图3 水资源承载人口评价结果图

Fig. 3 The evaluating diagram of China showing water resources' carrying capacity for population

从“以水定产”上,全国水资源承载工业增加值为22.27万亿元,对比现状工业增加值,处于超载状态,超载9.75万亿元。水资源承载工业增加值超载区呈区域性“沦陷”,江苏、山东等23个省市处于超载,建议针对超载区优化八大耗水产业结构,提高工业用水重复使用率等方式提升水资源承载工业增加值能力。

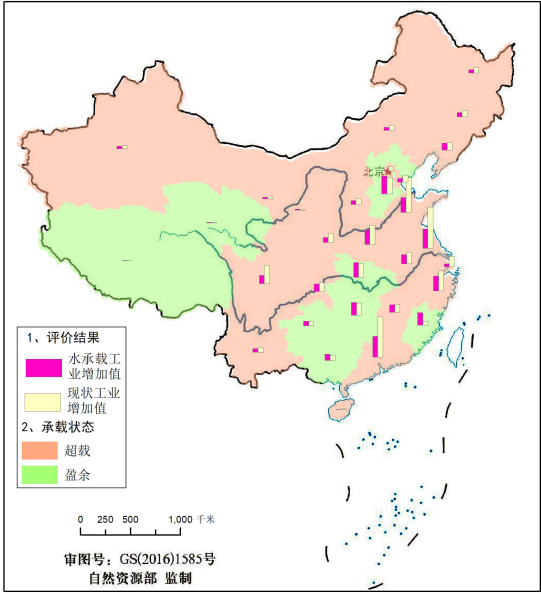


图4 水资源承载工业增加值评价结果图

Fig. 4 The evaluating diagram of China showing water resources' carrying capacity for industrial values added

从“以水定城”上,全国水资源承载城镇建设用地为2.00~6.45亿亩,对比现状城镇建设用地,在情景1(水资源承载城镇建设用地最低值),全国城镇建设用地处于超载状态,超载面积为2.80亿亩,在情景4(水资源承载城镇建设用地最高值),全国城镇建设用地处于盈余状态,盈余面积达1.65亿亩。江苏、山东、天津、重庆4个省市在水资源承载最大城镇建设规模下,仍处于超载状态,呈沿海少点“亏空”的分布特征,建议对该区域优化用水结构、实施最节约的用水方式,提高用水效率,增加供水总量等方式提升水资源承载城镇建设用地能力。

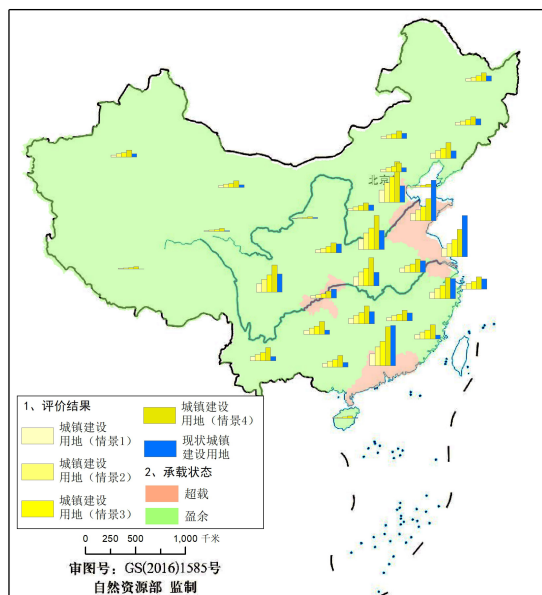


图5 水资源承载城镇建设用地评价结果图

Fig. 5 The evaluating diagram of China showing water resources' carrying capacity for urban construction projects

5 主要结论

本文对水资源承载能力评价方法进行了初步探索,提出了“以水定地”、“以水定人”、“以水定产”、“以水定城”的主控因素和计算规则,在此基础上,以全国31个省区市为例,评价水资源承载能力与状态,提出了相关的优化和提升建议,主要的结论如下:

(1)要素定义。本文将“以水四定”中的“地、人、产、城”功能指向为农业生产、人口生活、工业发展、城镇建设,分别定义为耕地面积、人口规模、工业增加值总量、城镇建设用地面积,使得量化的指标与农业、生活、工业、城镇相对应,能有效开展

水资源的合理控制与科学规划。

(2)主控因素。“以水定地”的主控因素分别为农业用水总量、复种指数、灌溉综合定额、雨养面积等;“以水定人”主控因素分别为生活用水总量、居民生活用水定额等;“以水定产”的主控因素分别为工业用水总量、工作增加值综合用水定额等;“以水定城”的主控因素分别为水资源承载人口规模、人均城乡用地面积、水资源承载工业增加值、工业用地产出强度等。

(3)综合定额。为提高评价结果的精准与科学性,本文创新提出了综合定额的概念。如在“以水定地”中提出了灌溉综合定额,将种植结构大于80%的主要农作物与相应的农作物灌溉定额进行加权和计算,使得评价结果的准确度大为提高。在“以水定产”中提出了工业增加值综合用水定额,将八大耗水与其他工业的经济总量占比与相应的万元增加值用水量进行加权和计算,揭示了工业用水中的主控因素。

(4)结果与建议。通过全国31个省区市的评价结构显示,在粗放用水情景下,全国耕地、人口、城镇用地等总体处于超载,而在节约用水情况下,全国耕地盈余3.37亿亩,人口规模盈余2.08亿人,城镇建设用地盈余1.65亿亩。在水资源承载最大规模下,仍有超载区,耕地超载呈中部“塌陷”,人口超载呈环状“倒塌”,工业超载呈区域性“沦陷”,城镇用地超载呈沿海少点“亏空”,需要从水资源总量、结构、效率等方面提升承载规模。

(5)与已有研究相比,本文试图清晰界定“人”、“地”、“产”、“城”的内涵与定量化表达方式,力求揭示各要素间的内在联系与计算规则,力争科学评价“以水四定”并将规模、空间等指标分解或落地,从而有效服务国土空间规划与用途管制等,具有一定的创新与特色。同时由于水资源承载力评价存在关联要素多且复杂,核心评价数据获取困难等问题,有待更深入挖掘内在关联,开展实地验证并优化等工作,以期“以水四定”的评价方法科学合理并能为实际所用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 党丽娟, 徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 341-348.

- [3] 金菊良,董涛,郦建强,等. 区域水资源承载力评价的风险矩阵方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):46-50.
- [4] 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.
- [5] 党丽娟,徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究,2015,22(3):341-348.
- [6] 唱彤,郦建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护,2020,36(1):44-51.
- [7] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):425-432.
- [8] 金菊良,沈时兴,崔毅,等. 面向关系结构的水资源集对分析研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):97-111.
- [9] CHEN Y Z, OVEREEM I, KETTNER A J, et al. Modeling flood dynamics along the superelevated channel belt of the Yellow River over the last 3000 years[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2015, 120(7):1321-1351.
- [10] 陈喜昌,刘宝珺,王洁民,等. 嘉陵江水资源的开发与防灾工程[J]. 沉积与特提斯地质,2000,20(2):27-32.
- [11] 李冰,董增川,杭庆丰,等. 盐城市水资源承载状态量化研究[J]. 水利经济,2019,37(1):65-69.
- [12] 郦建强,王建生,颜勇. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利,2011(23):42-51.
- [13] 吕一河,傅微,李婷,等. 区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2018,37(1):130-138.
- [14] 孙才志,吴永杰,刘文新. 基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J]. 水资源保护,2017,33(4):1-8.
- [15] 伍文琪,罗贤,黄玮,等. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(7):1517-1524.
- [16] 杨亮洁,杨永春. 甘肃省资源环境承载力时空分异[J]. 生态学报,2017,37(20):7000-7017.
- [17] 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.
- [18] 王鸿翔,陈秋米,张海涛,等. 基于主成分分析的宁夏水资源承载力研究[J]. 中国农村水利水电,2018(11):30-34.

A preliminary study on evaluating method of water resources' carrying capacities of China and its application

Song Zhi^{1,2}, Le Qilang², Chen Xuyu^{1,2}, Yang Nan³, Huang Tianjyu⁴

(1. Chengdu center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. China Geological environment Monitoring Institute, Beijing 100081, China; 4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Water resources' quantity is the most important constraining factor for the development levels of a society. Agriculture, population, industry, and town scales are four key factors which indicate the development levels of a society should be determined by water resources. This paper explores the evaluating method of water resources' carrying capacity of China, introduces the concept of "comprehensive quota", and tries to reveal the relations among cultivated land, main crops, industry, and water. The preliminary evaluating results of 31 provinces and municipalities of China show that waste of water is very serious in some areas and there is a lot of water-saving work should be done in the future. Even though evaluated at their largest water carrying capacities, a lot of areas are still in overloaded situation in the country. The overload of arable land is in the central part of the country. The overload of population is in an annular shape. The industrial overload is regional, and the urban land is overloaded while the coastal parts of the country are with a small "deficit". All of these overloaded areas need to improve their regional social carrying capacities in aspects of water resources, social structure and efficiency of industry.

Key words: carrying capacity of water; regional development factors should be determined by water; population, the scale of cultivated land, the scale of industry, city scale