

“双评价”中分层水资源模数评价方法的构建及应用研究

覃光旭¹, 桑东升¹, 彭力²

(1. 重庆市规划展览馆(重庆市规划研究中心), 重庆 400064;

2. 中国城市规划设计研究院西部分院, 重庆 401121)

摘要: “双评价”是国土空间规划编制的前提和基础,但在近年的实践中,“双评价”的支撑性受到一定质疑,评价技术方法不够完善是主要原因之一。水资源是“双评价”的基础评价因子,但由“水资源特征”向“空间利用条件”的传导路径仍不明确。研究剖析了市县水资源取用结构,基于政策、经济、生态、工程等限制因子分析,提出微观层面分层水资源模数评价方法,而后逐一分析各层水资源取用特征,将微观模数计算公式转化为可操作的宏观计算公式,成功构建出分层水资源模数评价理论方法,实现水资源特征空间化。案例验证结果表明,本方法优于评价指南推荐的相关方法,对国土空间规划的支撑性更强。

关键词: “双评价”;国土空间规划;水资源特征空间化;分层水资源模数;定量分析

《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》(中发[2019]18号)指出,资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”)是国土空间规划编制的前提与基础。国土空间规划改革前,资源环境承载力、城镇建设适宜性评价已分别有一定研究成果^[1,2],由于没有统一的技术规程,这些成果在评价目的、评价逻辑、成果表达等方面差异较大^[3,4]。伴随国土空间规划改革的推进,广东省、固原市等省市“双评价”试评成果率先形成^[5],《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》(以下简称“《指南》”)进而发布,标志着“双评价”的技术框架基本确定。

当前,国土空间规划多与“双评价”同步开展^[6,7]。《指南》虽然规定了统一的评价框架,但评价技术细节仍不够完善,致使在实践中出现刻画地域特征不够准确、空间评价结果趋同等现象,不利于发挥对国土空间规划的支撑作用^[8,9]。郝庆等^[10]指出,“双评价”仍存在指标体系不够优化、集成方法逻辑性不足等技术困境;李彦波等^[11]则认为,评价实践中应从适应地域特征的角度完善评价技术方法。总体来看,《指南》虽为“双评价”工作搭好了上层架构,但仍需要大量底层评价技术理论的创新予以支持^[12-14]。

水土资源同为国土空间规划关键支撑要素,也是《指南》明确的基础评价因子。由于土地资源本身即与空间直接绑定,因此,坡度、高程、土壤性质等土地类因子深刻地影响了国土空间布局,在“双评价”中,土地资源特征也相对容易刻画和表达^[15]。而水

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3800805)

作者简介: 覃光旭(1987-),男,重庆巴南人,博士,正高级工程师,研究方向为国土空间规划与管控。

E-mail: 492633269@qq.com

通讯作者: 桑东升(1968-),男,山东济南人,博士,正高级工程师,研究方向为国土空间规划与管控。

E-mail: sdstown@163.com

资源与空间开发保护适宜性之间逻辑关系更为复杂,虽然在生态文明导向下,“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”已形成广泛共识,但具体传导路径仍需要探索^[16,17]。目前,水资源评价相关研究多以行政区或流域为整体开展分析,Li等^[18]采用不同模型对北京市整体水资源承载力进行了评价;Yang等^[19]对阿克苏流域不同时期水资源短缺风险进行了评价;Yin等^[20]建立了贵州省喀斯特地区水安全评价模型。但现有研究对行政区或流域内部“水资源空间配给差异”关注较少^[21,22],因此,对国土空间规划布局支撑力较弱。

基于此,研究聚焦“双评价”中水资源评价技术理论,重点探索水资源对空间布局影响的传导路径。基于市县水资源取用结构,采用分层研究方式,首先提出水资源模数微观评价方法,进而深入分析各层水资源取用特征,将微观评价方法转化为宏观方法,由此构建出操作性较强的评价技术体系,将水资源量的特征转化为空间特征。案例分析表明,本方法能够较好地刻画地域水资源取用条件的空间特征,进而更好地支撑国土空间规划用地布局。

1 研究方法与数据来源

1.1 分层水资源模数评价方法的提出

1.1.1 水资源评价内涵探讨

“双评价”中的水资源评价,其要义在于如实刻画研究区域水资源取用条件,并支撑国土空间规划编制。首先,“双评价”的核心功能在于支撑国土空间规划中生态空间、农业空间、城镇空间布局。因此,水资源评价成果应体现出空间差异性,如若整个研究区域均被评价为同一等级,则该评价结果将失去实际指导价值。同时,为确保与实际情境相符,所评价的水资源不应是降雨量或水资源总量,而应当是水资源可取用量,即在合规、合理范围内,能够取用的水资源上限。以降雨量或水资源总量代替水资源可取用量,将存在较大偏差。此外,为做到“如实刻画”,除充分考虑评价对象自身的气象水文条件之外,还应重点考虑政策因子、工程因子、经济性因子、生态环境因子等诸多限制。由于实际水资源取用过程中受到各方面因素的深刻影响,评价过程中若忽视这些影响因子,也将造成较大误差。

因此,研究认为“科学、管用、好用”的水资源评价应符合以下要求:(1)评价结果体现出研究区域内部空间差异性;(2)评价内容为水资源可取用量;(3)评价过程充分考虑本底条件及影响因子。

1.1.2 《指南》推荐方法讨论与分析

2020年1月发布的《指南》(试行版)中,对水资源评价方法的描述为:“原则上,将干旱(多年平均降雨量低于200 mm,云贵高原等蒸散力较强的区域可根据干旱指数,西北等农业供水结构中过境水资源占比较大的区域可根据用水总量控制指标确定干旱程度)的区域确定为农业生产不适宜区”。本版《指南》未对水资源评价做细致描述,仅以此评价,全国大部分区域评价结果是一致的,对用地布局无法起到实质性指导作用。

2019年7月发布的《指南》(征求意见稿)^①中,对水资源评价则提供了两个方法,方法一:“对降雨量进行空间插值,并按照 ≥ 1200 mm、800~1200 mm、400~800 mm、

^①《指南》的征求意见稿较试行版在评价方法方面描述更为详细,因此也一并纳入讨论。同时,为方便描述,文中截取《指南》中农业生产导向下水资源评价相关内容,城镇建设导向下水资源评价与之类似。

200~400 mm、<200 mm分为好、较好、一般、较差、差5个等级”；方法二：“对于现状供水结构中过境水源占比较大且仅通过本地水资源总量难以全面反映农业供水条件的区域，可采用县级行政区用水总量控制指标模数计算。用水总量控制指标模数按照 ≥ 25 万 m^3/km^2 、13万~25万 m^3/km^2 、8万~13万 m^3/km^2 、3万~8万 m^3/km^2 、<3万 m^3/km^2 分为好、较好、一般、较差、差5个等级”。方法一实际上是用降雨条件代替水资源取用条件，误差较大，因为降雨量并不能全部转化为水资源取用量。方法二充分考虑了水资源取用的政策条件限制，但不能区分县级单元内部差异，即县域内所有斑块评价结果是相同的，显然不能支撑县级国土空间规划用地布局，对地市级层面的支撑也有限。

1.1.3 分层水资源评价模型构建

(1) 水资源分层概述

在实践中，可取用的水资源通常有本地水资源、过境水资源、引调水资源三种类型（表1）。原则上，以上三种水资源是相对独立的，但将受到政策条件约束。由于中国实行最严格的水资源管理制度，市县取用水量不得超过规定额度，也即三种水资源取用量相加不得超过已批复的水资源取用上限。而在该上限范围内，水资源可取用总量通常等于三种水资源各自可取用量的叠加。

表1 市县水资源取用类型及限制条件

Table 1 Classification and limiting condition of water resources in cities and counties

序号	水资源分层	释义	取用条件差异
1	本地水资源	本区域空间范围内降雨产生的水量中可以利用的部分	不超过总量的40%
2	过境水资源	过境河流转入本区域的水量中可以利用的部分	远离过境河道、与过境河道高程差较大的区域不便取用
3	引调水资源	通过工程措施跨流域获取的水资源	引调水工程未覆盖区域不可取用

此外，本地水资源受生态环境限制较大，为维持水生态系统的可持续运转，本地水资源的取用有一定额度限制，通常不超过总量的40%。过境水资源主要受取水经济性影响，即远离过境河道或与过境河道高差较大的区域，由于取水成本较高，无法使用过境水资源。引调水资源则受工程条件限制，引调水工程服务范围外的区域无法取用引调水资源。

由于本地水资源、过境水资源、引调水资源取用条件存在空间差异且相对独立。因此，分析刻画市县的水资源取用空间特征，可以转化为分析刻画本地水资源、过境水资源、引调水资源取用空间特征，再做空间叠加。

(2) 分层水资源模数计算方法分析

水资源模数用于表征水资源的空间分布特征，可用“特定区域水资源量/对应面积”表示。相应地，水资源可利用量模数则表示为“特定区域水资源可利用量/对应面积”，叠加分层视角后，可分别计算出市（县）域内任一栅格 i （即“双评价”中划分的栅格，通常取10 m×10 m或30 m×30 m的斑块）的本地水资源可利用量模数（ $A_{i\text{本地水}}$ ）、过境水资源可利用量模数（ $A_{i\text{过境水}}$ ）、引调水资源量模数（ $A_{i\text{引调水}}$ ）。

$$\begin{cases} A_{i\text{本地水}} = B_i/S_i \\ A_{i\text{过境水}} = G_i/S_i \\ A_{i\text{引调水}} = Y_i/S_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_i 为栅格 i 本地水资源可利用量 (m^3); G_i 为栅格 i 过境水资源可利用量 (m^3); Y_i 为栅格 i 引调水资源量 (m^3); S_i 为栅格 i 面积 (m^2)。

式 (1) 从基础逻辑出发, 以微观视角切入, 描述了分层水资源模数计算方式, 但实际操作中 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 或 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 栅格斑块的 B_i 、 G_i 、 Y_i 值均难以直接获取。因此, 为提升评价方法的可操作性, 研究从以下方面展开进一步分析:

针对本地水资源可利用量模数 ($A_{i\text{本地水}}$): 研究认为本地水资源与流域关系密切, 应当按小流域单元分界线进一步划分市、县行政区范围, 以便于刻画行政区内部本地水资源条件差异。考虑到同一条河流中的各个栅格本地水资源可利用量基本相同, 因此 $A_{i\text{本地水}}$ 可用“所在流域本地水资源可取用量/流域面积”表示。针对过境水资源可利用量模数 ($A_{i\text{过境水}}$): 研究认为应当从取水经济性入手, 通过对当地过境水取用习惯分析, 得出相应的过境水服务范围。而同一条河流过境水服务范围内, 各栅格取水条件应当近似, 因此 $A_{i\text{过境水}}$ 可用“河流过境水可取用量/该河流服务面积”表示。针对引调水资源可利用量模数 ($A_{i\text{引调水}}$): 一般情况下, 引调水工程方案或规划中会载明工程服务范围及对应的引调水量, 实际评价时可近似地认为, 同一引调水工程服务范围内, 各栅格取水条件相同, 因此 $A_{i\text{引调水}}$ 可用“引调水工程引水量/该工程服务面积”表示。由此, 可将式 (1) 转化为式 (2)。

$$\begin{cases} A_{i\text{本地水}} = B_{\text{流域}} / S_{\text{流域范围}} \\ A_{i\text{过境水}} = G_{\text{过境河流}} / S_{\text{过境河流服务范围}} \\ A_{i\text{引调水}} = Y_{\text{引调水工程}} / S_{\text{引调水工程服务范围}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $B_{\text{流域}}$ 为栅格 i 所在流域的本地水资源可利用量 (万 m^3); $S_{\text{流域范围}}$ 为栅格 i 所在流域面积 (km^2); $G_{\text{过境河流}}$ 为栅格 i 关联河道过境水资源可利用量 (万 m^3); $S_{\text{过境河流服务范围}}$ 为栅格 i 关联河道过境水服务面积 (km^2); $Y_{\text{引调水工程}}$ 为栅格 i 关联引调水工程引调水量 (万 m^3); $S_{\text{引调水工程服务范围}}$ 为栅格 i 关联引调水工程服务面积 (km^2)。

式 (2) 是式 (1) 在宏观层面的变式。由于市、县小流域划分及对应的本地水资源量数据均可在当地的水资源综合利用规划中查得; 过境水可取用量可由行政区用水限额扣除本地水可利用量、引调水量求得, 过境水服务范围可通过实地调研分析求得; 引调水服务范围及对应的引调水量可通过查阅工程方案或规划方案得到。因此, 式 (2) 具有较好的可操作性, 满足“好用”的要求。

(3) 水资源可利用总量评价方法分析

由于“水资源可利用总量=本地水资源可利用量+过境水资源可利用量+引调水资源量”, 因此, 任一栅格 i 的水资源可利用总量模数 (A_i) 为三种分层水资源模数之和 [如式 (3) 所示]。

$$A_i = A_{i\text{本地水}} + A_{i\text{过境水}} + A_{i\text{引调水}} \quad (3)$$

按《指南》要求, “双评价”结果应以分等级的方式输出, 以便于各评价因子 (水资源、土地资源、气象条件、灾害因素等) 之间的横向比较。因此, 水资源评价也需要对各栅格的 A_i 绝对值进行分级。研究参考《指南》(征求意见稿) 提出的分级方式, 即按: $\geq 25\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 、 $13\text{ 万} \sim 25\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 、 $8\text{ 万} \sim 13\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 、 $3\text{ 万} \sim 8\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 、 $< 3\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$, 划分: 好、较好、一般、较差、差 5 个等级, 由此实现对研究范围内所有栅格水资源条件优劣的评价。

1.1.4 分层水资源评价步骤小结

按照前述分析，分层水资源模数评价可按如下步骤进行：

第①步对市县水资源本底特征做详尽分析，摸清水资源取用特点、各类水资源取用前景，找到水资源取用的限制条件；第②步按照式（2），分析计算本地水资源、过境水资源、引调水资源可利用量模数；第③步按照式（3），计算水资源可利用总量模数，并对市县水资源可利用总量模数进行分级，得出水资源评价结果（图1）。

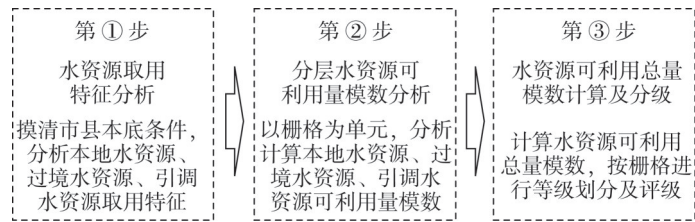


图1 分层水资源模数方法评价步骤

Fig. 1 The evaluation process of the classified water resources modulus method

1.2 研究区概况

选取四川省遂宁市为案例。遂宁地处四川盆地中部，是成渝双城经济圈重要节点城市，辖船山区、安居区、射洪市、蓬溪县、大英县，面积 5322 km²，人口 281 万人。全市北高南低，东、西高中部低，海拔 250~675 m，河谷平坝、丘陵、低山分别占比 26%、69%、5%，多年平均降雨量为 944 mm，涪江由北至南穿越全域，郪江、琼江、沈水河等主要支流则呈树枝状分布。

2019 年，遂宁市“双评价”与国土空间总体规划同步开展，规划期限为 2020—2035 年，“双评价”成果直接指导国土空间规划用地布局。为方便叙述，研究以农业生产导向下的水资源评价为例，城镇建设导向下的评价与之类似。

1.3 数据来源

研究数据来源如表 2 所示，其中，引调水工程服务范围、流域单元划分矢量数据根据相应材料进行矢量化加工得到。

表 2 数据来源

Table 2 Source of data

数据名称	数据格式	数据来源
行政区划/地类图斑分布	矢量	国土三调
县级行政单元用水限额	文本	最严格水资源管理制度考核办法
引调水量、引调水工程服务范围	文本、图件	相关规划及工程方案
高程、坡度分布	矢量	测绘成果
本地水资源量、过境水资源量/流域单元划分	文本、图件	水资源综合利用规划

2 结果分析

2.1 基于《指南》推荐方法的评价

遂宁本地水资源量/过境水资源量约为 1/13，过境水资源量占比大，按照《指南》要求，采用县级行政区用水指标模数方法。参考《遂宁市实行最严格水资源管理制度考核办

法》，船山、安居、蓬溪、射洪、大英5县（市、区）用水总量分别不超过2.64亿m³、1.80亿m³、1.73亿m³、3.47亿m³、1.96亿m³，对应的模数分别为43万m³/km²、14万m³/km²、14万m³/km²、23万m³/km²、28万m³/km²，其评级结果如表3和图2所示。

表3 遂宁市各县（市、区）用水总量指标模数及评级

Table 3 Total available water resources modulus of each county of Suining city					
行政区	船山	安居	蓬溪	射洪	大英
用水总量控制指标/亿m ³	2.64	1.80	1.73	3.47	1.96
行政区面积/km ²	616	1257	1252	1496	701
用水总量控制指标模数/(万m ³ /km ²)	43	14	14	23	28
评级	好	较好	较好	较好	好

2.2 基于分层水资源模数方法的评价

2.2.1 水资源取用特征分析

遂宁本地水资源总量为11.4亿m³，过境水资源总量则达到147亿m³，此外，还被纳入四川省水资源调配框架之内，主要涉及毗河供水工程和武都引水工程，遂宁均属于受水区。2020年，遂宁用水总量为7.71亿m³，其中本地水资源、过境水资源、引调水资源取用量分别约为4.74亿m³、2.54亿m³、0.43亿m³（表4）。

参考《四川省实行最严格水资源管理制度考核办法》，遂宁市用水总量不超过11.6亿m³。现状以本地水、过境水为主，引调水取用较少，但本地水资源开发利用量占本地水资源总量比例达到42%，进一步开发本地水资源容易引发生态问题。因此，考虑到生态影响，至规划期末本地水资源取用不宜超过4.56亿m³（40%警戒线）。根据《四川省水资源综合利用规划》及相关建设计划，毗河供水工程年计划调入遂宁水量为1.67亿m³，服务涪江右岸区域；武都引水工程年调入2.66亿m³，服务涪江左岸区域。因此，根据相关工程安排，引调水取用不应超过4.33亿m³。按照水资源取用上限计算，至规划末期，遂宁市还可取用过境水2.71亿m³。由此，遂宁市本地水资源、过境水资源、引调水资源

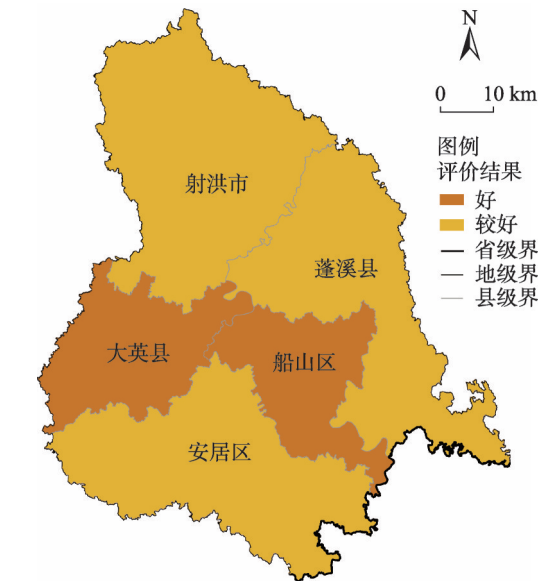


图2 基于《指南》推荐方法的评价结果
Fig. 2 Evaluation result based on the recommendation method of the Guide

表4 遂宁市各类水资源现状及可取用量预测

Table 4 Current and predicting value of the classified water resources in Suining city (亿m ³)				
年份	本地水资源实际取用量	过境水资源实际取用量	引调水资源实际取用量	水资源取用上限
2020年（现状）	4.74	2.54	0.43	11.4
年份	本地水资源可取用量	过境水资源可取用量	引调水资源可取用量	水资源取用上限
2035年（预测）	4.56	2.71	4.33	11.6

取用将形成相对均衡的局面，也能够更好地保障城市可持续发展。

2.2.2 分层水资源可利用量模数分析

(1) 本地水资源可利用量模数分析

参照当地水文水资源技术资料，遂宁市共可划分为21个流域单元，结合相关资料中载明的各流域单元本地水资源总量，可计算出对应的本地水资源可利用量。进一步，可按照式（2）计算出各流域单元的本地水资源可利用量模数，结果如表5、图3所示。

表5 各流域单元本地水资源可利用量模数
Table 5 Distribution of local water resources modulus (万 m³/km²)

流域分区	行政分区	本地水资源可利用量模数	流域分区	行政分区	本地水资源可利用量模数
涪江东区	船山	9.79	郪江区	安居	9.31
	蓬溪	8.22		船山	9.22
涪江西北区	大英	9.03		大英	8.57
	射洪	7.29		射洪	7.72
涪江西区	安居	8.02	琼江区	安居	8.54
	船山	9.48		大英	7.78
荷叶溪区	船山	10.44	沈水河区	蓬溪	9.40
	蓬溪	8.97		射洪	8.30
芝溪区	船山	9.23	桃花河区	射洪	9.25
	蓬溪	8.47	梓江区	射洪	9.04
	射洪	7.96	吉安河区	蓬溪	7.98

(2) 过境水资源可利用量模数分析

遂宁市过境水资源主要集中于涪江（128 亿 m³，占全市的 87%），其余河道过境水资源量均较小，再考虑到水质、生态基流等限制，过境水取用只能集中于涪江。涪江过境水受水区必然满足两个条件，一是离江面较近，二是与江面高程相差较小。从地形上看，一方面，临近涪江江面的区域分布有冲击平坝，远离江面的区域则以丘陵地貌为主，平坝与丘陵之间界限相对明晰。另一方面，平坝区域与临近江面高程接近，丘陵区域高程则显著高于临近江面。因此，近江平坝区域取水条件显著优于丘陵地区（图4）。

农业灌溉需水量大，产值相对较低，若供水成本较高，则无法持续运行。研究对涪江两岸典型灌溉单元进行了实地踏勘，结果显示（图5），现状为从涪江取水灌溉的农田几乎都分布于沿岸平坝区域，而外侧丘陵区域则通过蓄水（本地水）、引水（引调水）等

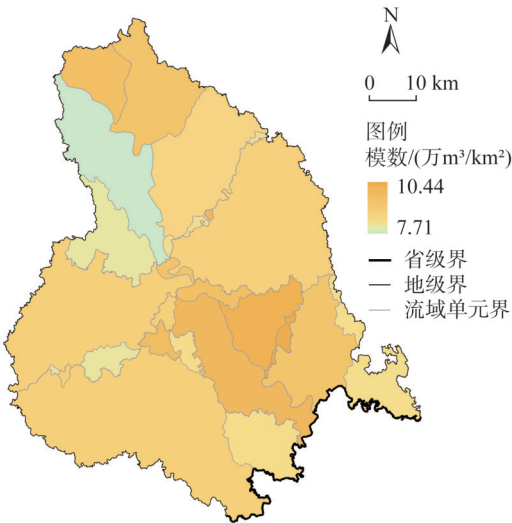


图3 本地水资源可利用量模数计算结果
Fig. 3 Evaluation result of local water resources modulus

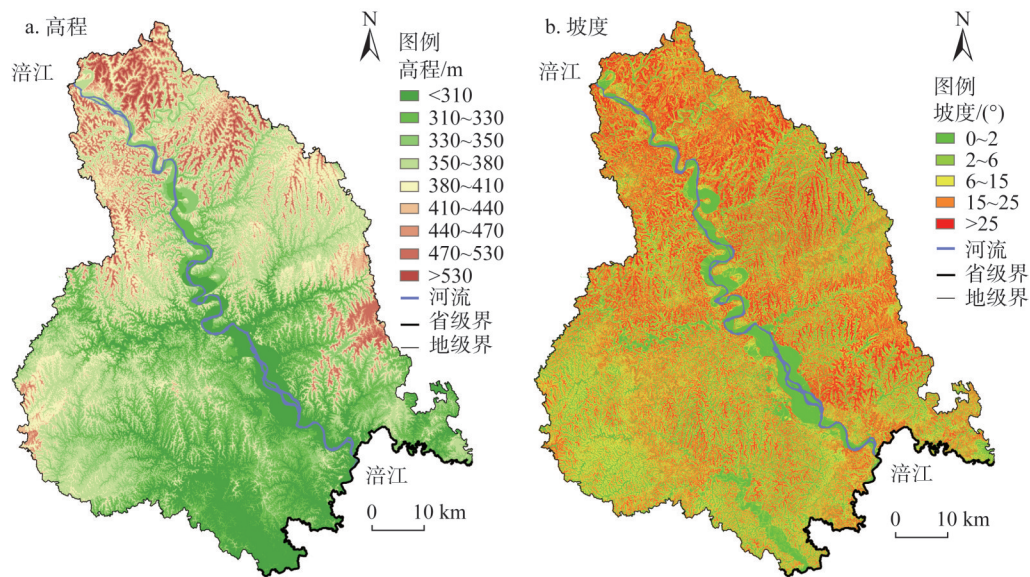


图4 遂宁市高程、坡度分布
Fig. 4 Elevation and slope distribution of Suining city



图5 涪江沿岸典型灌溉单元
Fig. 5 Typical irrigating unit along the Fujiang River

其他方式实施灌溉，或不进行灌溉（旱地）。基于上述分析，研究认为当涪江过境水用作农业灌溉时，其受水区主要为近江平坝区域。

研究通过与临近江面高程做差的方式提取涪江沿岸的平坝区域，并通过卫星影像、国土三调成果对比以及现场踏勘等方式予以复核（图6）。经计算，有条件取用过境水的区域共计345 km²。根据水资源取用限额，涪江过境水可取用量约2.71亿m³，折合过境

水可利用量模数为 $80.21 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 。

(3) 引调水资源量模数分析

遂宁市涉及两项省内水资源调配工程,其中毗河供水工程服务射洪、大英、安居三个县(市、区),设计年供水量 1.67 亿 m^3 ;武都引水工程服务射洪、蓬溪、船山三个县(市、区),设计年供水量 2.66 亿 m^3 。引调水仅能服务干支渠道覆盖的区域,其余区域则无法取用引调水。研究整理了毗河供水工程、武都引水工程干支渠建设方案,按照其服务范围划定了对应的受水区域,进而按照式(2),计算出各受水区域引调水资源量模数,结果如图7所示。

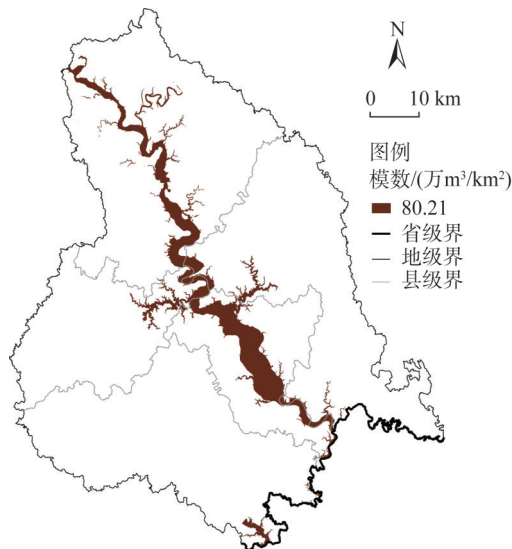


图6 过境水资源量可利用模数计算结果

Fig. 6 Evaluation result of transiting water resources modulus

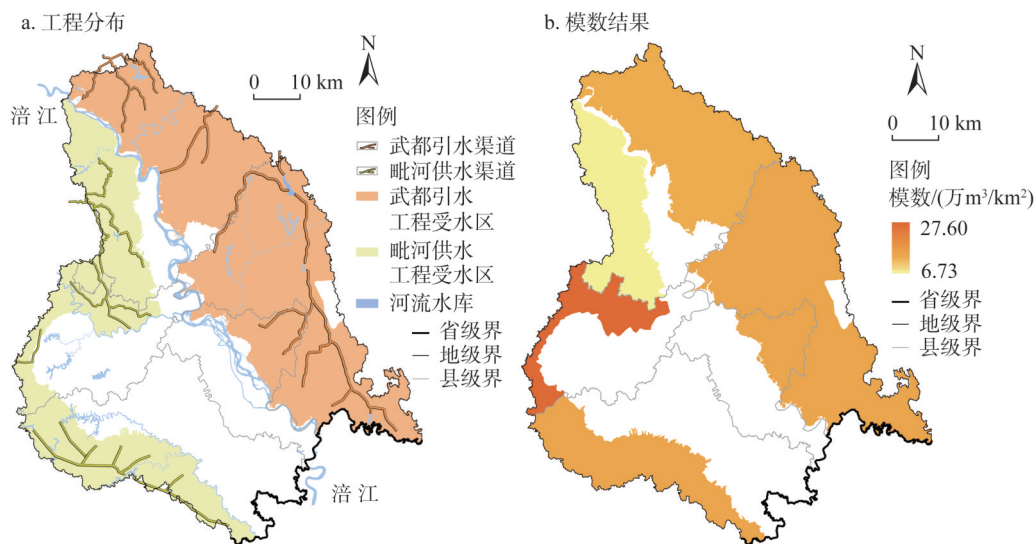


图7 引调水工程分布及引调水模数计算结果

Fig. 7 Diversion water project and the evaluation result diverting water resources modulus

2.2.3 水资源可利用总量模数计算分析

按照式(3),将本地水可利用量模数、过境水可利用量模数、引调水模数在空间上叠加,得到水资源可利用总量模数。全域水资源可利用总量模数在 $7.25 \text{ 万} \sim 117.03 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 之间,参照《指南》等级划分,遂宁市农业耕作导向下的水资源适宜性好、较好、一般、较差区域分别占比 11.4% 、 57.7% 、 27.6% 、 3.3% ,无适宜性差的区域(图8)。

2.3 评价结果及方法对比分析

2.3.1 评价结果分析

《指南》推荐方法评价结果(图2)、分层水资源模数法评价结果(图8)差异显著,

主要表现在涪江沿岸区域以及引调水服务区域，研究认为分层水资源模数评价结果更符合实际。

首先，遂宁本地居民普遍有逐水（涪江）而居的情怀，在农耕时代，涪江两岸即为全市生产能力最为旺盛的区域。南宋兵部侍郎刘仪凤在《南楼记》中曾这样描写遂宁，“平原沃野，贯以涪江，气象宽舒，为东蜀之都会”。分层水资源模数评价结果反映出涪江两岸平坝区域取用过境水的天然优势。因此，更符合实际。

其次，遂宁市域西侧为涪江与沱江分水岭、东侧为涪江与嘉陵江分水岭，原本均属于取用水条件相对差的区域。但在四川省综合调度下，通过毗河供水工程、武都引水工程分别对以上区域进行了跨区域补给，实则将改变以上区域水资源承载力。分层水资源模数评价结果刻画引出调水工程对取水格局的影响。因此，更符合遂宁特征。

2.3.2 评价方法对比

基于降雨量插值的评价方法（《指南》推荐方法一）只考虑了自然条件，实质上评价的是降雨，而非取水，当然也未考虑市县在实际取水情境中的诸多限制。因此，其评价结果必然偏差较大（表6）。

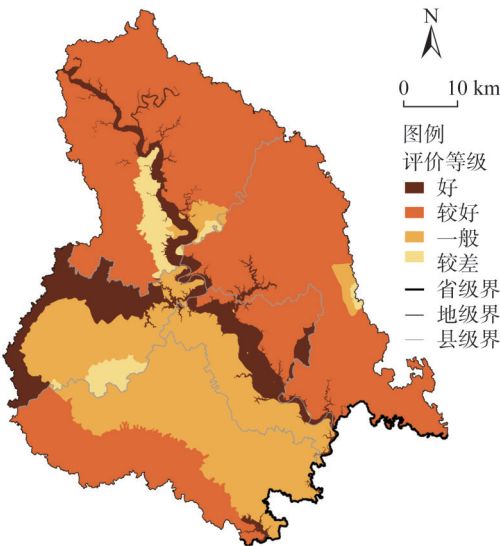


图8 基于分层水资源模数的评价结果
Fig. 8 Evaluation result based on the classified water resources modulus method

表6 评价方法优缺点对比
Table 6 Comparison of the evaluation methods

序号	评价方法	评价结果体现空间差异性	评价对象为水资源可取用量	评价过程对本底条件和限制因子的响应				
				本底条件	政策因子	生态环境因子	经济因子	工程因子
1	基于降雨量插值的评价	√	×	√	×	×	×	×
2	基于行政区用水指标模数的评价	×	√	√	√	×	×	×
3	基于分层水资源模数的评价	√	√	√	√	√	√	√

基于行政区用水指标模数的评价方法（《指南》推荐方法二）过度强调行政区的概念，忽略了行政单元内生态环境因子、经济因子、工程因子的空间差异，其评价结果精度不足，存在县级行政单元内所有栅格结果一致的硬伤。同时，行政边界本身也不宜作为水资源取用条件差异的分界线（表6）。

综合对比，分层水资源模数评价方法能够如实刻画研究区域水资源取用条件，并支撑农业生产、城镇建设空间布局，且相关基础数据容易获取，操作过程也较为便利，可推广应用（表6）。

2.4 相关讨论

2.4.1 关于非农业生产导向下的水资源评价讨论

城镇建设与农业生产均从自然界中取水,且取用的水资源均可划分为本地水、过境水、引调水三种类型,因而城镇建设导向下与农业生产导向下水资源评价类似,均适用于分层水资源模数评价理论。两者本地水资源取用特征和引调水资源取用特征相近,但城镇建设单位用水量对应的产值显著高于农业生产。因此,城镇用水能够负担更大的取水成本。针对过境水资源取用,则可以负担更长的输水距离和更大的水位高差。在具体评价工作中,还应结合当地的取用水习惯,分析过境水服务范围,以提升城镇建设导向下水资源评价的准确性。

生态空间对于水资源的需求则主要与降雨关联,与城镇、农业取水特征差异较大。因而,具体评价工作中应重点分析降雨特征,并结合《指南》中提出的水土保持、水源涵养等生态评价因子,刻画水资源对生态空间的影响。

2.4.2 关于评价精度的讨论

相较于《指南》推荐方法,本文提出的方法精度更高。当然,如果进一步采用更为精确的基础数据,对评价对象开展更为深入的调研,并修正评价方法,可使得评价结果更为精确,但同时也会增加评价工作的复杂性和操作难度。对此,研究认为应当区分评价尺度,并视实际需求而定。在市(县)域宏观尺度下,“双评价”主要用于指导空间结构、主体功能划分时,不可盲目追求超高精度的评价结果,而应当结合实际,制定可操作性更强的评价技术路线。在中心城区尺度,用于支撑具体用地布局决策时,则应当更充分地考虑微观条件,作出精细化评价。例如,可考虑供水工程实施难度差异、用水费用差异等,进一步区分各地块开发利用条件。

3 结论与讨论

本文针对“双评价”方法体系不够完善、评价结果不够精确等问题,聚焦水资源评价因子,从剖析水资源取用结构出发,基于政策、经济、生态、工程等限制因子分析,提出微观层面分层水资源模数评价方法,并结合本地水资源、过境水资源、引调水资源取用特征,将微观模数计算公式转化为可操作的宏观计算公式,由此构建出分层水资源模数评价理论方法,解决了“水资源特征”向“空间利用条件”传导路径不明确的问题。案例验证结果显示本方法可操作性较强,可有效支撑国土空间规划用地布局。

本文提出的分层水资源模数评价方法较《指南》推荐评价方法具有一定的优势,尤其是实现了行政区及流域内部空间水资源特征的差异化描述,对国土空间规划的支撑性更强,但仍有进一步完善的空间。例如,随着社会发展水平逐渐提升,水权交易、生态补偿等政策运用更加广泛,将会对区域水资源取用格局产生影响,评价中应予以考虑;由于各个地区用水习惯不同,评价等级的阈值也不宜统一设限,而是在现状调查的基础上,分析得出符合地域特征的阈值体系。国土空间规划编制对“双评价”精度有一定要求,实践中应当建立科学的评价方法体系,并开展扎实的实地走访与踏勘,方可精准刻画地域特征,做实支撑性。另外,“双评价”也不宜过度强调评价精度,而应当以“有用”为原则,在支撑不同国土空间规划应用情景时差异化对待。

参考文献(References):

- [1] 段佩利, 刘曙光, 尹鹏, 等. 中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系. 经济地理, 2018, 38(5): 60-67. [DUAN P L, LIU S G, YIN P, et al. Spatial-temporal coupling coordination relationship between development strength and resource environmental bearing capacity of coastal cities in China. Economic Geography, 2018, 38(5): 60-67.]
- [2] 唐常春, 孙威. 长江流域国土空间开发适宜性综合评价. 地理学报, 2012, 67(12): 1587-1598. [TANG C C, SUN W. Comprehensive evaluation of land spatial development suitability of the Yangtze River Basin. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(12): 1587-1598.]
- [3] 陈晨, 宋小冬, 钮心毅. 土地适宜性评价数据处理方法探讨. 国际城市规划, 2015, 30(1): 70-77. [CHEN C, SONG X D, NIU X Y. Discussion on data processing method of land suitability evaluation. Urban Planning International, 2015, 30(1): 70-77.]
- [4] 孙烨, 张响, 马小晶. 基于生态安全视角的用地适宜性评价方法探索: 以株洲枫溪生态城为例. 城市规划学刊, 2012, (s1): 234-240. [SUN Y, ZHANG Y, MA X J. Method of land suitability evaluation based on ecological security: Taking Fengxi Eco-city of Zhuzhou as an example. Urban Planning Forum, 2012, (s1): 234-240.]
- [5] 陈伟莲, 李升发, 张虹鸥, 等. 面向国土空间规划的“双评价”体系构建及广东省实践. 规划师, 2020, 36(5): 21-29. [CHEN W L, LI S F, ZHANG H O, et al. The establishment of "dual evaluations" and Guangdong practice. Planners, 2020, 36(5): 21-29.]
- [6] 魏旭红, 开欣, 王颖, 等. 基于“双评价”的市县级国土空间“三区三线”技术方法探讨. 城市规划, 2019, 43(7): 10-20. [WEI X H, KAI X, WANG Y, et al. Discussions on the methods of "three zones and three Lines" implementation at the spatial levels of city and country based on "double evaluations". City Plan Review, 2019, 43(7): 10-20.]
- [7] 袁媛, 何冬华. 国土空间规划编制内容的“取”与“舍”: 基于国家、部委对市县空间规划编制要求的分析. 规划师, 2019, 35(13): 14-20. [YUAN Y, HE D H. A trade-off analysis on the content of territorial spatial planning: Based on city and county level. Planners, 2019, 35(13): 14-20.]
- [8] 王亚飞, 樊杰, 周侃. 基于“双评价”集成的国土空间地域功能优化分区. 地理研究, 2019, 38(10): 2415-2429. [WANG Y F, FAN J, ZHOU K. Territorial function optimization regionalization based on the integration of "double evaluation". Geographical Research, 2019, 38(10): 2415-2429.]
- [9] 白娟, 黄凯, 李滨. “双评价”成果在县(区)级国土空间规划中的应用思路与实践. 规划师, 2020, 36(5): 30-38. [BAI J, HUANG K, LI B. An analysis of the application of "dual evaluations" results in country level national land use and spatial plan. Planners, 2020, 36(5): 30-38.]
- [10] 郝庆, 邓玲, 封志明. 面向国土空间规划的“双评价”: 抗解问题与有限理性. 自然资源学报, 2021, 36(3): 541-551. [HAO Q, DENG L, FENG Z M. The "double evaluation" under the context of spatial planning: Wicked problems and restricted rationality. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 541-551.]
- [11] 李彦波, 邓方荣, 罗道. “双评价”结果在长沙市国土空间规划中的应用探索. 规划师, 2020, 36(7): 33-39. [LI Y B, DENG F R, LUO X. The application of "double evaluations" in Changsha national land use and space plan. Planners, 2020, 36(7): 33-39.]
- [12] 杨钦宇, 余婷, 卢庆强, 等. 市县“双评价”技术方法及应用体系研究: 基于国土空间规划整体认知视角. 城市发展研究, 2023, 30(2): 7-12, 24. [YANG Q Y, YU T, LU Q Q, et al. Research on technology methods and application systems of "double evaluation" at city and county levels: Based on the overall cognition of territorial spatial planning. Urban Development Studies, 2023, 30(2): 7-12, 24.]
- [13] 覃荣诺, 谢波, 何建华, 等. 县级国土空间“双评价”的技术难点与优化策略. 规划师, 2021, 37(9): 10-16. [QIN R N, XIE B, HE J H, et al. Technical keypoints and improvement strategy of "double evaluations" in county territory spatial planning. Planners, 2021, 37(9): 10-16.]
- [14] 岳文泽, 吴桐, 王田雨, 等. 面向国土空间规划的“双评价”: 挑战与应对. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2299-2310. [YUE W Z, WU T, WANG T Y, et al. "Double evaluations" for territorial spatial planning: Challenges and responses. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2299-2310.]
- [15] 杨立焜, 王璇, 孙道成, 等. 地形位置指数在“双评价”中的研究和应用. 自然资源情报, 2022, (8): 59-64, 58. [YANG L K, WANG X, SUN D C, et al. Application and research of TPI in "dual evaluation". Natural Resources Information, 2022, (8): 59-64, 58.]

- [16] 金荻. 基于人均需水量预测的水资源人口承载力研究. 规划师, 2015, 31(s1): 314-317. [JIN D. The population carrying capacity of water resource based on per capita water-demand prediction. Planners, 2015, 31(s1): 314-317.]
- [17] 周广金, 童亚莉, 王凌青, 等. 国土空间规划中水生态空间及保护线的多维识别技术与应用. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3102-3117. [ZHOU G J, TONG Y L, WANG L Q, et al. Multi-dimensional identification technology and application of water ecological space and protection line in the territorial spatial planning. Journal of Natural Resources, 2022, 37(12): 3102-3117.]
- [18] LI Y Q, ZHANG J, SONG Y Y. Comprehensive comparison and assessment of three models evaluating water resource carrying capacity in Beijing, China. Ecological Indicators, 2022, 143: 109305, Doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109305.
- [19] YANG P, ZHANG S Q, XIA J, et al. Risk assessment of water resource shortages in the Aksu River Basin of Northwest China under climate change. Journal of Environmental Management, 2022, 305: 114394, Doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114394.
- [20] YIN B L, GUAN D J, ZHOU L L, et al. Sensitivity assessment and simulation of water resource security in karst areas within the context of hydroclimate change. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120994, Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120994.
- [21] 史紫薇, 冯文文, 钱会. 基于流域尺度的甘肃省水资源承载力评价. 生态科学, 2021, 40(3): 51-57. [SHI Z W, FENG W W, QIAN H. Evaluation of water resources carrying capacity in Gansu province based on watershed. Ecological Science, 2021, 40(3): 51-57.]
- [22] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 京津冀水资源承载力风险评估模型构建研究. 地理研究, 2021, 40(9): 2623-2637. [YU H Z, LI L J, LI J Y. Construction of risk assessment model of water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region. Geographical Research, 2021, 40(9): 2623-2637.]

Proposing and applying a novel method based on classified water resources modulus in "double evaluation"

QIN Guang-xu¹, SANG Dong-sheng¹, PENG Li²

(1. Chongqing Planning Exhibition Gallery (Chongqing Planning Research Institute), Chongqing 400064, China; 2. China Academy of Urban Planning and Design Western Branch, Chongqing 401121, China)

Abstract: "Double evaluation" is the premise and foundation of territorial spatial planning. However, in recent years, the supporting of "double evaluation" has been questioned, and the imperfection of evaluation technology is one of the main reasons. Water resources are the basic evaluation factor of "double evaluation", but the transmission path from "water resources characteristics" to "space utilization conditions" is still unclear. This article analyzes the structure of water resources utilization in cities and counties. Based on the analysis of limiting factors such as policy, economy, ecology and engineering, a micro-level hierarchical water resources modulus evaluation method is proposed. Then, the characteristics of water resources utilization in each layer are analyzed one by one. The micro-modulus calculation formula is transformed into an operable macro-calculation formula, and the theoretical method of hierarchical water resources modulus evaluation is successfully constructed, which can realize the spatialization of water resources characteristics. The case verification results show that this method is superior to the relevant methods recommended by the evaluation guidelines and has stronger support for territorial spatial planning.

Keywords: "double evaluation"; territorial spatial plan; spatialization of water resources characteristics; classified water resources modulus; quantitative analysis