

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007073

基于 GIS 的地下水资源分区研究及承载本底评价

高萌萌, 李瑞敏, 刘 琼, 王 轶, 李小磊
(中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 地下水资源承载本底与自然属性密切相关, 地下水资源分区是评价地下水资源承载本底的重要基础工作。文章以新一轮地下水资源评价成果和主要平原盆地、部分省(区)市地下水资源最新调查评价成果为基础, 综合地形地貌、构造单元、气候分带、地表水流域、含水层介质等多项指标, 把地表水和地下水看作一个整体, 将全国划分为 26 个一级区、143 个二级区、412 个三级区。通过将地下水资源分区与县级行政区划耦合确定了 4 942 个计算单元, 利用地下水可开采模数指标, 实现了地下水资源承载本底评价由以自然单元的评价到县级行政单元的成果表达, 从而建立了地下水资源承载本底评价空间数据基础, 可服务于地下水资源承载能力动态评价和地下水合理开发利用与管理。地下水资源承载本底结果显示: 我国地下水资源承载本底总体表现出平原盆地地区为中-高水平, 北方干旱区为低水平, 区域差异性较大。承载本底等级为高、较高、中、较低、低的县(区、市)分别为 774、332、798、387、573 个, 面积占比分别为 11.15%、5.87%、19.56%、12.09%、52.34%, 基本反映出我国地下水资源禀赋条件和区域分布规律。

关键词: 承载本底; 地下水; 资源分区; 评价单元; GIS

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0184-07

Evaluation of natural carrying capacity and zoning of groundwater resources based on GIS

GAO Mengmeng, LI Ruimin, LIU Qiong, WANG Yi, LI Xiaolei
(China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Natural carrying capacity of groundwater resources is closely related to natural attributes, and groundwater resource zoning is the important and basic work for evaluating the natural carrying capacity of groundwater resources. Based on the results of the recently completed national project of groundwater investigation as well as the latest survey and evaluation results of groundwater resources in the main plain or basins and a number of provinces (autonomous regions), this paper takes the surface water and groundwater as a whole, and divides the mainland areas into 26 first-level zones, 143 second-level zones and 412 third-level zones, according to a few indicators such as topography, geological structural unit, climate zoning, surface water basin and aquifer medium. The mainland areas are further divided into 4942 calculation units by combining groundwater resource zoning with county administrative areas. By using the exploitable modulus index, the evaluation results of the natural carrying capacity of groundwater resources are thus assigned to every counties, and a sound basis of spatial data of the natural carrying capacity of groundwater resources evaluation is set up, which can serve for the dynamic evaluation of carrying capacity of groundwater resources and support the rational utilization and management of groundwater. The evaluation results show that the natural carrying capacity of groundwater resources in China is medium-high level in plain basin area, and low-

收稿日期: 2020-07-16; 修订日期: 2020-09-12

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160328; DD20190506); 国家自然科学基金资助项目(41702386)

第一作者: 高萌萌(1989-), 女, 硕士, 工程师, 从事水文地质、环境地质调查研究。E-mail: gaomm@cigem.cn

通讯作者: 李瑞敏(1964-), 女, 教授级高级工程师, 从事水工环地质、资源环境承载能力评价研究。E-mail: lirm@cigem.cn

level in the arid areas in north China. There are 774, 332, 798, 387 and 573 counties (districts and cities) with high, mid-high, medium, mid-low and low levels, and the area accounts for 10.15%, 5.87%, 19.56%, 12.09%, and 52.34%, respectively. The results basically reflect the natural conditions and regional distribution of groundwater resources in China.

Keywords: natural carrying capacity; groundwater; resource zoning; evaluation unit; GIS

20世纪以来,随着生产力水平提高和人口数量的急剧增长,人类对自然资源的开发程度逐渐加强,全球人口、资源与环境问题愈发严峻,资源环境承载能力研究越来越受到重视。承载力概念理论逐渐被广泛应用于土地资源、矿产资源、水资源、生态环境等各个领域^[1-2]。党的十八大报告明确指出,面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势,必须树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念。随后,党的十八届三中全会提出了“建立资源环境承载能力监测预警机制,对水土资源、环境容量和海洋资源超载区实行限制性措施”。近些年,基于对资源环境承载能力的不断探索和研究,李瑞敏等^[3-6]提出了“资源环境承载协调理论”,该理论构建了承载本底和承载状态两个层次的服务目标,承载本底反映资源禀赋的优劣程度,承载状态则反映资源环境供容能力与社会经济发展的匹配程度。

我国地下水资源约占水资源总量的三分之一,是水资源的重要组成部分。20世纪90年代后期开始,随着我国地下水供水比例不断升高,区域地下水过量开采引发的生态环境问题受到持续关注。不合理开采地下水造成了地面沉降、地面塌陷、植被退化、土地沙漠化、土壤盐渍化、海水入侵等一系列地质环境问题^[7-8],这对区域地下水资源可持续利用、生态环境及经济社会的可持续发展提出了挑战。进入21世纪,伴随着新一轮全国地下水资源评价的完成,地下水资源承载能力的研究逐步开始,多侧重于评价模型和方法的研究,主要集中在水资源短缺的干旱半干旱地区^[9-13]。

地下水资源承载本底评价与自然属性密切相关,而地下水资源分区是评价地下水资源承载本底的重要基础工作。本文从地下水资源分区入手,建立了“自然单元-计算单元-行政单元”的评价单元框架,利用地下水可开采模数指标,实现了全国地下水资源承载本底由自然单元到行政单元的成果表达,建立地下水资源承载本底评价空间数据库。开展全国地下水资源承载本底评价,可摸清全国地下水资源在自然禀赋条件下的分布状况和规律,为地下水资源合理开发利用与

资源配置提供依据,为将来建立长期性、常态性和可持续性评价及监测预警机制打下基础。

1 全国地下水资源分区

国内外学者和不同部门,根据各个领域水资源评价与管理的不同需求和用途,提出了多种水资源分区的划分方式^[14-19]。各省在本省区域内进行了地下水资源分区,但是工作程度和分区原则不一,导致无法与全国地下水资源分区有效对接。本次地下水资源分区,将地表水和地下水作为一个整体进行研究,在新一轮全国地下水资源一级分区的基础上,继续划分二级和三级区,重点解决了各省地下水资源分区的衔接问题,为地下水资源承载本底评价自下而上的动态更新提供空间数据基础。

1.1 分区原则

(1) 独立性和完整性相结合

地下水资源区是各种组成要素的整体,是一个存在于一定环境之中的相对独立的整体,是补、径、排和水循环的统一体。进行地下水资源分区,应考虑储水空间的完整性和水循环的连续性,保证相对独立和完整的地下水循环演化体系。

(2) 科学性与可行性相结合

地下水资源分区是地下水资源承载能力评价的基础,为行政管理规划服务。在进行地下水资源分区时,既要考虑分区的科学性,又要考虑评价的可操作性及服务性,尽可能保证行政单元的完整。

(3) 地下水与地表水相结合

地表水与地下水都源自于大气降水,是一个完整的水资源系统,在一定条件下水量相互转化。分区时综合考虑水文动态规律和区域水循环演化,将地表水与地下水联系起来,作为一个整体进行研究。

(4) 继承性与创新性相结合

以现有地下水资源研究成果为基础,保持成果的连贯性和一致性,并进一步完善和创新。

1.2 分区指标与分区方法

1.2.1 分区指标

本文通过对地形地貌、地质构造、气候条件、地表

水流域、水文地质特征等的分析研究,在新一轮地下水资源调查地下水资源一级分区的基础上,进一步进行二级和三级分区。地形地貌和构造单元对地下水的形成与分布规律起着主导控制作用,在其控制下,形成各自完整独立的水文地质单元;不同气候条件,降雨和蒸发有很大的差别,对地下水系统的补给和排泄有着很重要的控制作用;地表水流域与地下水不可分割的系统性决定着地表水流域在一定程度上反映了地下水资源的分布状况;水文地质特征,包括含水层结构、含水层介质等,能最直接地反映出地下水资源的赋存条件。

综上考虑,分区指标如下:

一级分区指标:地形地貌、构造单元、气候条件、一级地表水流域;

二级分区指标:二级地貌单元、二级地表水流域;

三级分区指标:三级地貌单元、三级地表水流域、含水层介质。

1.2.2 分区方法

分区区划一般有定量和定性两类方法,常用的方法有主导因素分析法、模糊聚类法、层次分析法、主成分分析法、GIS 空间叠加分析法等^[20-21]。地下水资源分区指标没有定量描述,因此采用定性分析,利用主导因素分析法,结合 GIS 空间叠加分析,对地下水资源进行分区。

首先,根据我国整体地形地貌、地质构造、气候条件及一级地表水流域的特征差异,划分一级区,在此基础上,结合每个一级区内的次一级地形地貌、次一级水系流域划分二级区,再结合水文地质单元的划分,体现地下水含水层结构的不同,加入含水层介质指标,进行三级区划分。

1.3 分区结果

本文在新一轮全国地下水资源一级分区的基础上,收集柴达木盆地、鄂尔多斯盆地、松辽平原、长江中下游平原等重点区域^[22-31]的地下水资源评价成果,依照上述分区原则及分区方法,经系统梳理,形成全国地下水资源一、二、三级分区,并参照各省(区、县)地下水资源分区结果进行了适当修正。共计 26 个一级区,143 个二级区,412 个三级区(表 1)。

2 地下水资源承载本底评价单元研究

2.1 自然单元-计算单元-行政单元

本次评价以自然单元和行政单元相结合的方法,以自然单元为基础评价单元,在自然单元评价的基础上,进行县级行政单元的评价。难题是如何将自然单

表 1 全国地下水资源承载本底评价单元

Table 1 Evaluation unit of natural carrying capacity of groundwater resources

一级区 代码	一级区名称	二级 分区	三级 分区	计算 单元
I	黑龙江、松花江流域地下水资源区	10	19	242
II	辽河流域地下水资源区	5	17	196
III	黄淮海地区地下水资源区	5	26	743
IV	内蒙古北部高原区地下水资源区	7	7	62
V	鄂尔多斯高原及银川河套平原地下水资源区	4	15	101
VI	黄土高原地下水资源区	5	18	310
VII	河西走廊及北山地区地下水资源区	3	10	48
VIII	黄河上游地区地下水资源区	3	22	96
IX	柴达木盆地地下水资源区	2	17	48
X	准噶尔盆地地下水资源区	15	29	201
XI	塔里木盆地地下水资源区	20	37	194
XII	长江下游地区地下水资源区	2	7	131
XIII	长江中游地区地下水资源区	4	11	212
XIV	四川盆地地下水资源区	4	4	224
XV	金沙江流域区地下水资源区	6	16	175
XVI	闽浙丘陵地区地下水资源区	7	26	375
XVII	鄱阳湖水系区地下水资源区	6	23	151
XVIII	洞庭湖水系区地下水资源区	7	21	285
XIX	乌江流域区地下水资源区	2	12	89
XX	台湾地区地下水资源区	3	13	39
XXI	珠江、韩江流域区地下水资源区	7	7	185
XXII	西江流域区地下水资源区	4	18	224
XXIII	雷琼地区地下水资源区	4	7	358
XXIV	怒江、澜沧江流域区地下水资源区	4	14	147
XXV	藏北高原区地下水资源区	2	5	26
XXVI	雅鲁藏布江及藏南诸河流域区地下水资源区	2	11	80
合计		143	412	4 942

元和行政单元结合,如何将自然单元的地下水资源量分解到县级行政单元?针对该问题,笔者在地下水资源三级区(即自然单元)的基础上,结合县级行政单元,分解划分了计算单元,有机结合自然单元和行政单元,建立了“自然单元-计算单元-行政单元”的评价单元框架。首先将地下水资源量按面积加权平均分解到计算单元,求得每个计算单元的地下水资源量,再将县级行政单元内的各计算单元的地下水资源量相加,得到行政单元的地下水资源量。

为更直观地说明“自然单元-计算单元-行政单元”之间的关系,以黑龙江省伊春市为例,伊春市包含市辖区、铁力市、嘉荫县三个区,分别被所属的三级区划分为 7 个计算单元,如表 2 和图 1 所示。

表 2 伊春市地下水资源承载能力评价单元表

Table 2 Evaluation units table of groundwater resources carrying capacity in the City of Yichun

市	县	计算单元名称	计算单元代码	所属三级区	所属二级区
伊春市	伊春市辖区	伊勒呼里山、小兴安岭丘陵区地下水 资源亚区_伊春市辖区	12-1_230701	伊勒呼里山、小兴安岭丘陵区地下水 资源亚区	黑龙江中下游流域地下水 资源区
		小兴安岭丘陵区地下水资源亚区_伊 春市辖区	15-1_230701	小兴安岭丘陵区地下水资源亚区	松花江中游流域地下水 资源区
	嘉荫县	逊河平原地下水资源亚区_嘉荫县	12-2_230722	逊河平原地下水资源亚区	黑龙江中下游流域地下水 资源区
		伊勒呼里山、小兴安岭丘陵区地下水 资源亚区_嘉荫县	12-1_230722	伊勒呼里山、小兴安岭丘陵区地下水 资源亚区	黑龙江中下游流域地下水 资源区
	铁力市	小兴安岭南坡丘陵区地下水资源 亚区_铁力市	14-1_230781	小兴安岭南坡丘陵区地下水资源 亚区	松花江上游流域地下水 资源区
		松嫩平原地下水资源亚区_铁力市	14-2_230781	松嫩平原地下水资源亚区	松花江上游流域地下水 资源区
		小兴安岭丘陵区地下水资源亚区_铁 力市	15-1_230781	小兴安岭丘陵区地下水资源亚区	松花江中游流域地下水 资源区

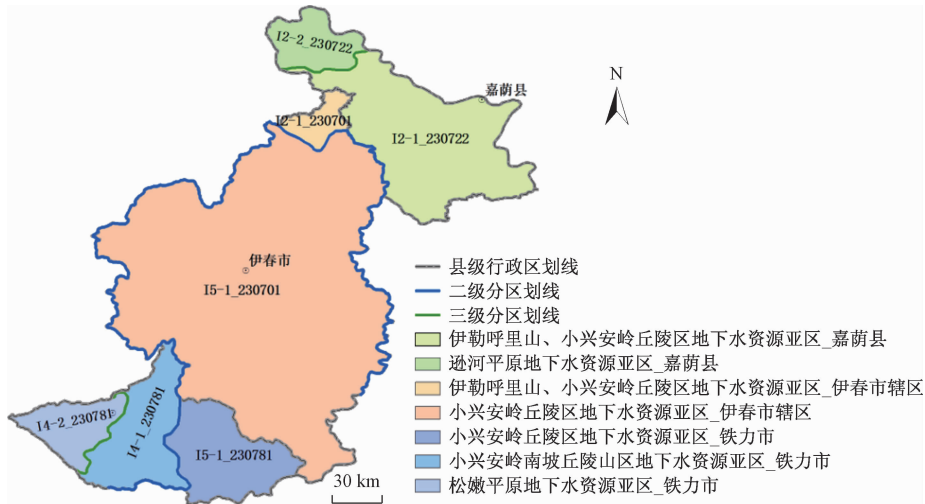


图 1 伊春市地下水资源承载能力评价单元图

Fig.1 Evaluation units map of groundwater resources carrying capacity in the City of Yichun

2.2 计算单元划分结果

全国地下水资源三级分区 412 个,县级行政单元 2 864 个,经三级分区和县级行政单元切割划分为计算单元共 4 942 个(表 1)。

3 全国地下水资源承载能力本底评价

3.1 评价指标

据《区域地质资源环境承载能力评价技术要求(征求意见稿)》^①,本次评价从地下水可开采资源模数单指标评价入手,开展地下水资源承载本底评价,用于反映地下水资源在自然本底状况下的禀赋条件。根据评价结果承载本底划分为高、较高、中、较低、低等 5 个等级,分级标准见表 3。

表 3 地下水资源承载本底评价指标分级

Table 3 The classification of groundwater resources natural carrying capacity evaluation index

等级	地下水可开采资源模数/($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
高	≥ 10
较高	[7.5, 10)
中	[3.5, 7.5)
较低	[2, 3.5)
低	< 2

3.2 评价方法

地下水资源承载本底基础评价指标为地下水可开采资源模数,是指单位面积上的地下水可开采资源量,计算公式为:

① 李瑞敏,孟晖,李小磊,等. 区域地质资源环境承载能力评价技术要求(征求意见稿),2018。

$$M_e = \frac{Q_e}{S} \quad (1)$$

式中: M_e ——地下水可开采资源模数/($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);

Q_e ——地下水可开采资源量/($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$);

S ——评价区总面积/ km^2 。

可开采资源量评价以自然单元(即地下水资源分区)为基础评价单元。以新一轮全国地下水资源评价数据为基础,更新了主要平原盆地、部分省(区、市)地下水资源最新调查评价成果。结合计算单元,采用面积加权平均法,获得县域行政单元可开采资源量评价数据。

3.3 评价结果

根据上述评价方法,分别对自然单元(412 个地下水资源三级分区)和行政单元(2 864 个区县)进行了地下水资源承载本底评价,结果见表 4 和表 5。

表 4 地下水资源承载本底(自然单元)评价结果统计表

Table 4 Statistics of natural carrying capacity evaluation of groundwater resources(natural unit)

承载本底等级	三级分区个数	个数占比/%	面积占比/%
高	71	17.23	11.30
较高	45	10.92	6.95
中	102	24.76	18.16
较低	47	11.41	13.92
低	147	35.68	49.68

表 5 地下水资源承载本底(县级行政单元)评价结果统计表

Table 5 Statistics of natural carrying capacity evaluation of groundwater resources(county-level administrative unit)

承载本底等级	县级行政单元数	个数占比/%	面积占比/%
高	774	27.03	10.15
较高	332	11.59	5.87
中	798	27.86	19.56
较低	387	13.51	12.09
低	573	20.01	52.34

(1)我国地下水资源分布受控于气候条件、地貌单元与大地构造背景、水文地质条件,空间差异性较大。承载本底总体表现出平原盆地区为中-高水平,北方干旱区为低水平,区域差异性较大。

(2)从自然单元看,我国地下水资源承载本底高的地区多集中在平原盆地区,主要有黄淮海平原、江汉洞庭平原、长江下游平原、松辽平原、三江平原、成都平原、汾渭盆地、岭南地区、雷琼地区等。承载本底低的地区主要分布在西北内陆干旱半干旱地区、山地丘陵区、西南高原区,主要有藏北川北高原、内蒙古北部高原、黄土高原、塔里木盆地、柴达木盆地、北山地区、大

巴山地区、赣南山区等。

(3)从县域单元看,全国 2 864 个县级行政单元中,承载本底等级为高、较高、中、较低、低的县(区、市)分别为 774,332,798,387,573 个,面积占比分别为 11.15%、5.87%、19.56%、12.09%、52.34%。

4 结论

(1)本文以新一轮地下水资源评价成果和主要平原盆地、部分省(区、市)地下水资源最新调查评价成果为基础,综合地形地貌、构造单元、气候分带、地表水流域、含水层介质等多项指标,把地表水和地下水看作一个整体,将全国划分为 26 个一级区、143 个二级区、412 个三级区,重点解决了各省地下水资源分区的衔接问题,为地下水资源承载本底评价自下而上的动态更新打下基础。

(2)通过将地下水资源分区与县级行政区划耦合,建立了“自然单元-计算单元-行政单元”的评价单元框架,确定了 4 942 个计算单元,利用地下水可开采模数指标,实现了地下水资源承载本底评价由以自然单元评价到以县级行政单元的成果表达,从而建立了地下水资源承载本底评价空间数据基础。

(3)全国地下水资源承载本底在自然单元和县域行政单元的评价结果,基本反映出我国地下水资源禀赋条件和区域分布规律,可为下一步地下水资源承载能力评价和地下水合理开发利用与管理服务。

(4)自然单元划分精度影响地下水资源承载本底的评价精度,全国地下水资源承载本底评价在地下水资源三级分区的基础上进行,反映了宏观的空间分布规律。但在进行小范围的地下水资源承载本底评价时,需要更详细的地下水资源分区做支撑。

参考文献(References):

- [1] 樊杰,周侃,王亚飞. 全国资源环境承载能力预警(2016 版)的基点和技术方法进展[J]. 地理科学进展, 2017,36(3): 266-276. [FAN J, ZHOU K, WANG Y F. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016) [J]. Progress in Geography, 2017,36(3): 266-276. (in Chinese)]
- [2] 殷志强,李瑞敏,李小磊,等. 地质资源环境承载能力研究进展与发展方向[J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1103-1115. [YIN Z Q, LI R M, LI X L, et al. Research progress and future development

- directions of geo-resources and environment carrying capacity[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1103 – 1115. (in Chinese)]
- [3] 李瑞敏, 殷志强, 李小磊, 等. 资源环境承载协调理论与评价方法[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 80 – 87. [LI R M, YIN Z Q, LI X L, et al. A study of the coordination theory and evaluation method of resource environment carrying capacity [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(1): 80 – 87. (in Chinese)]
- [4] LI R M, YIN Z Q, WANG Y, et al. Geological resources and environmental carrying capacity evaluation review, theory, and practice in China[J]. *China Geology*, 2018, 1(4): 556 – 565.
- [5] 李瑞敏, 杨楠, 李小磊, 等. 资源环境承载能力评价方法探索与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2019. [LI R M, YANG N, LI X L, et al. Exploration and practice of geological resources and environmental carrying capacity evaluation method [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019. (in Chinese)]
- [6] 王轶, 李瑞敏, 高萌萌, 等. 基于双曲距离协调度模型的地下水资源与经济承载协调关系[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 88 – 93. [WANG Y, LI R M, GAO M M, et al. An analysis of coordination relationship between groundwater resources and economic carrying capacity based on hyperbolic distance coordination model[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(1): 88 – 93. (in Chinese)]
- [7] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004. [ZHANG Z H, LI L R. Groundwater resources in China[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2004. (in Chinese)]
- [8] 张人权, 梁杏, 靳孟贵. 水文地质学基础[M]. 7版. 北京: 地质出版社, 2018. [ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G. Fundamentals of hydrogeology [M]. 7th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2018. (in Chinese)]
- [9] 张鑫, 王纪科, 蔡焕杰, 等. 区域地下水资源承载力综合评价研究[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(3): 24 – 27. [ZHANG X, WANG J K, CAI H J, et al. Comprehensive evaluation on resources carrying capacity of regional groundwater[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(3): 24 – 27. (in Chinese)]
- [10] 门宝辉, 王志良, 梁川, 等. 物元模型在区域地下水资源承载力综合评价中的应用[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2003, 35(1): 34 – 37. [MEN B H, WANG Z L, LIANG C, et al. Application of matter element model to evaluating on of resources carrying capacity of regional groundwater[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2003, 35(1): 34 – 37. (in Chinese)]
- [11] 王顺久, 杨志峰, 丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. *资源科学*, 2004, 26(6): 104 – 111. [WANG S J, YANG Z F, DING J. Projection pursuit method of comprehensive evaluation on groundwater resources carrying capacity in Guanzhong plain[J]. *Resources Science*, 2004, 26(6): 104 – 111. (in Chinese)]
- [12] 刘敏, 聂振龙, 王金哲, 等. 华北平原地下水资源承载力模糊综合评价[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 311 – 315. [LIU M, NIE Z L, WANG J Z, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater resources carrying capacity in North China plain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6): 311 – 315. (in Chinese)]
- [13] 郝鸿峰, 张赫轩, 贾卓, 等. 挠力河流域灌区地下水资源承载力评价[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(1): 33 – 39. [XI H F, ZHANG H X, JIA Z, et al. Evaluation of groundwater resources carrying capacity in Naoli River Basin irrigation area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(1): 33 – 39. (in Chinese)]
- [14] 王兆馨. 美国国家地下水资源分区总结性评价简介[J]. *水文地质工程地质*, 1981, 8(4): 62 – 49. [WANG Z X. A brief introduction to the summary evaluation of national groundwater resources zoning in the United States [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1981, 8(4): 62 – 49. (in Chinese)]
- [15] 娄华君, 毛任钊, 夏军, 等. 中国地下水资源系统三级分区及其在海河流域的应用[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 554 – 563. [LOU H J, MAO R Z, XIA J, et al. The study for groundwater resources system of China with three-rated appraising method of sub area[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(6): 554 – 563. (in Chinese)]
- [16] 韩再生. 世界地下水资源图编制情况简介[J]. *地质通报*, 2004, 23(8): 823 – 824. [HAN Z S. Brief introduction to the compilation of the world groundwater resources map [J]. *Regional Geology of China*, 2004, 23(8): 823 – 824. (in Chinese)]
- [17] CHENG Yanpei, DONG Hua. Groundwater system division and compilation of Groundwater Resources Map of Asia[J]. *Journal of Groundwater Science and*

- Engineering, 2015, 3(2): 127 - 135.
- [18] 水利电力部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. [Hydrographic Office, Ministry of Water Resources and Hydropower. Water resources assessment in China [M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1987. (in Chinese)]
- [19] 张宗祜, 秦毅苏, 荆继红, 等. 中国地下水资源图(1: 5000000)[M]. 北京: 地质出版社, 2017. [ZHANG Z H, QIN Y S, JING J H, et al. Map of Groundwater Resources in China (1: 5000000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [20] 陈南祥, 姜新慧. 基于 GIS 与层次分析法的地下水资源分区研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(11): 60 - 61. [CHEN N X, JIANG X H. Study on division of groundwater resources based on GIS and AHP [J]. Yellow River, 2010, 32(11): 60 - 61. (in Chinese)]
- [21] 陈守煜, 李亚伟. 基于模糊迭代聚类的水资源分区研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(6): 848 - 851. [CHEN S Y, LI Y W. Fuzzy clustering iterative model and its application in water resource partition [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(6): 848 - 851. (in Chinese)]
- [22] 武选民, 文冬光, 吴登定, 等. 我国主要平原盆地地下水资源可持续利用的几点思考[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(6): 96 - 99. [WU X M, WEN D G, WU D D, et al. Some thoughts on sustainable utilization of groundwater resource in the main large Plains and basins of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(6): 96 - 99. (in Chinese)]
- [23] 武选民, 史生胜, 黎志恒, 等. 西北黑河下游额济纳盆地地下水系统研究(上)[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(1): 16 - 21. [WU X M, SHI S S, LI Z H, et al. The study on the groundwater flow system of Ejina basin in lower reaches of the Heihe River in Northwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(1): 16 - 21. (in Chinese)]
- [24] 武选民, 史生胜, 黎志恒, 等. 西北黑河下游额济纳盆地地下水系统研究(下)[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(2): 30 - 33. [WU X M, SHI S S, LI Z H, et al. The study on the groundwater flow system of Ejina basin in lower reaches of the Heihe River in Northwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(2): 30 - 33 (in Chinese)]
- [25] 湛天德, 陈旭光, 王文科, 等. 准噶尔盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009. [ZHAN T D, CHEN X G, WANG W K, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources and environmental problems in the Junggar Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [26] 刘斌, 门国发, 王占和, 等. 塔里木盆地地下水勘察[M]. 北京: 地质出版社, 2009. [LIU B, MEN G F, WANG Z H, et al. Groundwater exploration in Tarim Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [27] 赵海卿, 赵勇胜, 杨湘奎, 等. 松嫩平原地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009. [ZHAN H Q, ZHAO Y S, YANG X K, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources and environmental problems in Songnen Plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [28] 韩颖, 阎世龙, 马汉田, 等. 山西六大盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009. [HAN Y, YAN S L, MA H T, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources and environmental problems in six basins of Shanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [29] 杨湘奎, 杨文, 张烽龙, 等. 三江平原地下水资源潜力与生态环境地质调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008. [YANG X K, YANG W, ZHANG F L, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources potential and eco-environmental geology in Sanjiang Plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008. (in Chinese)]
- [30] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查平原[M]. 北京: 地质出版社, 2008. [ZHANG Z J, FEI Y H, CHEN Z Y, et al. Investigation on sustainable utilization of groundwater in the North China Plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008. (in Chinese)]
- [31] 程旭学, 陈崇希, 闫成云, 等. 河西走廊疏勒河流域地下水资源合理开发利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008. [CHENG X X, CHEN C X, YAN C Y, et al. Investigation and evaluation on rational development and utilization of groundwater resources in Shule River Basin of Hexi Corridor [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008. (in Chinese)]