

文章编号:0559-9350(2020)07-0796-09

适宜西北内陆区地下水功能区划的体系指标属性与应用

王金哲^{1,2}, 张光辉¹, 崔浩浩¹, 王 茜¹, 董海彪¹, 郝 静¹

(1. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

2. 自然资源部 地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要:我国西北内陆平原区自然湿地和天然植被对地下水埋藏状况具有强烈依赖性,为增强对地下水“水位-水量”的管控能力,地下水功能区划成为迫切的需求。针对西北内陆各流域中下游平原区如何确定地下水的生态功能保护区、基本农田质量保护区和可开采资源功能区的需求,基于新创建的“干旱半干旱区地下水功能评价与区划理论方法”,本文详解了适宜西北内陆区地下水功能区划的体系指标属性组成、特征、内涵、区划原则和方法。在石羊河流域应用效验结果,一级功能区划的 B_1 类面积占研究区总面积的30.60%、 B_2 类面积占12.90%和 B_3 类面积占56.50%;在 B_1 类的一级功能区内地下水规模开采区面积占该功能区总面积的58.84%、适量开采区面积占41.16%,在 B_2 类的一级功能区内自然湿地保护区面积占该功能区总面积的11.20%、天然植被保护区面积占48.39%、泉水水源保护区面积占9.58%以及耕地质量保护区面积占30.83%,结果符合当地地下水赋存条件和功能状况,有利于最严格水资源“水位-水量”双控管理。

关键词:西北内陆平原区;地下水;功能区划;属性内涵

中图分类号: TV211

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200206

1 研究背景

在我国西北内陆各流域的中下游平原区,例如甘肃的黑河流域和石羊河流域,降水少,气候干旱,蒸发强烈,自然湿地与天然植被生态以及基本农田质量对地下水(潜水)埋藏状况具有强烈依赖性^[1-3]。潜水位埋深过大,地下水的生态功能受损,导致自然湿地和天然植被退化;潜水位埋深过浅,土壤盐渍化加剧,影响基本农田土地质量。同时,地下水还是西北内陆平原区经济社会发展生产发展的重要水源之一,不宜全流域、全时段禁止地下水开采,尤其在上游山区降水连年偏枯情势下春旱农田灌溉仍需应急开采;如果全面禁止开采,将会严重影响当地经济社会的平稳发展。因此,开展西北内陆平原区地下水功能评价与科学区划,对于促进西北内陆地区地下水超采与生态保护的“水位-水量”双控管理具有十分重要意义。

西北内陆各流域平原区,不仅年降水量不足300 mm,多数下游区不足100 mm,当地生活生产用水和自然湿地及天然植被生态用水,几乎完全依赖于上游出山地表径流的下泄补给^[4-5]。在水资源天然性紧缺的西北内陆地区,如何实现地下水超采治理、自然湿地和天然植被生态修复,同时,又有效保护基本农田土地质量和经济社会合理开发利用地下水资源,是一个复杂的问题^[6-11],不仅与不同植被群的不同生态水位密切相关,而且,还与这些自然生态保护区周边的基本农田防控大范围盐渍化加剧的土壤盐渍化极限有关^[12-13]。如此多元因素制约,如何实现西北内陆平原区地下水功能的科学

收稿日期:2020-03-31;网络首发时间:2020-07-13

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200713.0859.001.html>

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0406106);国家专项基本科研业务费重大创新研究项目(JYYWF20180403);国家青年自然科学基金项目(41807217)

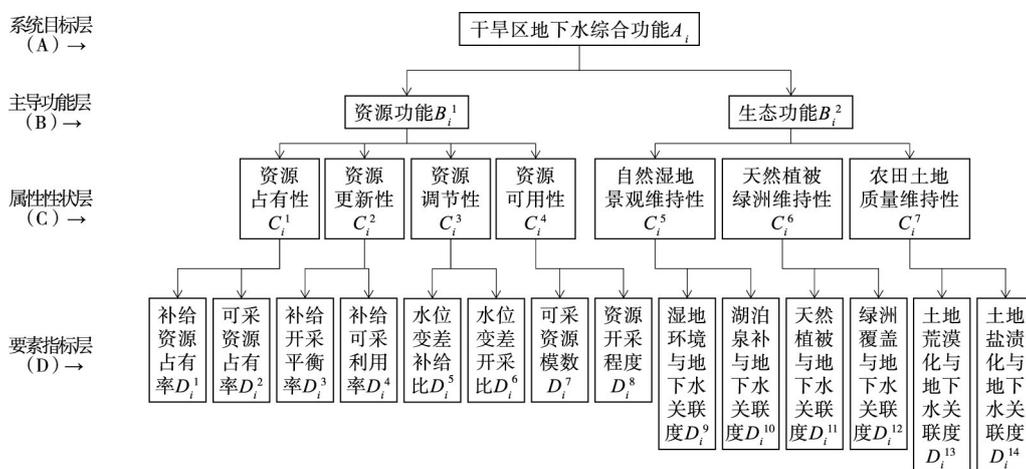
作者简介:王金哲(1969-),教授级高级工程师,从事地下水功能评价与区划基础应用研究。E-mail: 176294116@QQ.com

通讯作者:张光辉(1959-),研究员,长期从事水循环演化与水土资源合理开发利用研究。E-mail: Huanjing59@163.com

区划, 已成为破解当地经济社会用水与自然生态需水之间冲突矛盾的关键^[14]。地下水功能区划的前提和基础方面, 地下水功能评价体系不仅需要充分考虑地下水系统的自然资源属性、天然生态环境属性, 还需要充分考虑经济社会属性, 科学和精准圈定地下水的资源供给主导功能区域、亟需修复和保护的生态主导功能区域, 支撑主管部门精准合理管控, 进而, 才能最大限度地发挥地下水的资源、生态功能最佳综合功效和自然生态合理保护^[15-16]。

目前, 我国地下水功能区划的研究主要集中于两个方面: 一是基于水利部下发的《地下水功能区划技术大纲》(2005年8月), 开展的全国性地下水功能区划^[17-19]; 二是基于中国地质调查局印发的《地下水功能区评价和区划技术要求》(2006年6月), 开展的华北平原、东北地区、山西六大盆地和西北地区地下水功能评价与区划^[20-23]。二者共性是都以地下水的主导功能作为区划必要条件, 即都把区域地下水的自然资源属性、生态环境属性和经济社会属性作为基础条件考虑, 且重视生态环境保护。二者不同之处, 水利部门的地下水功能区划, 一、二级功能分区给定具体的判别条件, 尤其涉及地下水资源功能, 需满足条件才能进行功能分区, 全国范围内的划分标准统一; 而自然资源国土部门的地下水功能区划, 首先依据统一的地下水功能评价与区划指标体系, 分别构建符合各大区域(西北、华北、东北地区等)地下水系统自然属性规律的地下水功能评价指标体系, 充分考虑《地下水功能区评价和区划技术要求》基本技术要求, 然后, 开展全流域或全区域地下水功能评价, 再在功能评价成果的基础上, 集合各流域或地区管理需求, 进行地下水功能区划。虽然自然资源国土部门的地下水功能区划是建立在功能评价基础上, 但它是基于1:25万区域地下水资源及其环境问题调查评价, 尚不能适应流域尺度高精度的地下水功能区划, 尤其是支撑“水位-水量”双控管理的地下水功能区划。

本项成果是在国家重点研发项目“我国西部特殊地貌区地下水合理开发与生态功能保护”的大量调查、监测和综合研究基础上, 继承性创新研发而成。研究中针对西北内陆平原区流域水循环过程、平原区地表水-地下水之间频繁转化和地下水形成特点, 以及干旱强烈蒸发条件下自然湿地、天然植被绿洲和农田土壤质量(盐渍化状况)对地下水位强烈依赖的独特性, 和生态严重退化及地下水严重超采急需针对性科学治理、确保地下水合理开发与生态有效保护的需求, 充分考虑了不同类型、不同单元生态环境退变的渐变-质变-灾变情势与地下水位埋深之间阈值相关性和空间分布特征。该方法的显著特点是, 以流域尺度为基本研究单元, 除重点考虑了驱动地下水系统功能变化的开采影响之外, 还将出山地表径流量在向中、下游输运途径中引用、转化为地下水及地下水转化为地表水等水文效应作为重要研究内容, 并高度重视在中、下游及其不同区带地下水位埋深变化对生态环境维持作用(功能)的关系量化识别, 不仅增设了“自然湿地景观维持性”和“资源更新性”, 还新增了“湿地环境与地下水关联度”“湖泊泉补与地下水关联度”“绿洲覆盖与地下水关联度”和“土地荒



(图中A、B、C和D为不同指标层符号, i 为评价区编码; 1、2、3、...为各指标的序号)

图1 干旱区地下水功能评价体系的架构

漠化与地下水关联度”等生态功能的要素指标(图1),使大部分地下水功能评价指标都赋有了新的内涵,这样更符合西北内陆平原区地下水及其相关生态功能的自然属性特征,因此奠定了客观开展干旱半干旱区地下水功能区划的科学基础。

2 基本术语与区划原则

2.1 基本术语 干旱区地下水功能是指我国西北内陆各流域中、下游区地下水的质和量及其在空间和时间上的变化对人类社会和环境所产生作用或效应,主要包括地下水的资源供给功能和生态环境维持功能等。

干旱区地下水资源功能是指西北内陆各流域中、下游区具备一定的补给、储存和更新条件的地下水资源供给保障作用或效应,具有相对独立、稳定的补给源和水的供给保障能力。

干旱区地下水生态功能是指西北内陆各流域中、下游区地下水系统对陆表植被、湖泊(湿地)或土地质量良性维持的作用或效应,如果地下水系统发生变化,则生态环境会做出相应的改变。

干旱区地下水功能区划是指依据西北内陆各流域中、下游区浅层地下水的自然属性、社会属性和生态环境关联性在区域上相似性及差异性,基于地下水功能评价结果及其优势与弱势功能空间分布状况和保护管控相关法规,按照确认的指标体系和标准进行地下水功能分区的行为,以支撑西北内陆地区地下水合理开发与生态有效保护为目的。

2.2 地下水功能区划原则 在西北内陆各主要流域,气候、水循环条件与过程、地下水系统赋存与时空分布规律,以及自然湿地和天然植被生态对潜埋藏状况依赖关系等方面都具有相同或相似性,决定了那里的地下水功能在空间上分布具有相似的区带性和特征。由此,形成如下统一的干旱区地下水功能区划原则:(1)贯彻新时代生态文明建设要求,尊重自然、顺应自然和保护自然,充分考虑西北内陆平原地下水功能的自然属性特征和承载能力。(2)立足于地下水自然属性,兼顾长期人为因素影响下的社会属性和生态环境维持能力,以人与自然协调、可持续发展为根本原则。(3)保护优先与合理开发并重,区域地下水开发利用时,应优先考虑对下游区自然湿地和天然植被生态的影响与可接受程度,确保自然生态保护区地下水的生态水位不被破坏性干扰;同时,在保护生态时,也高度重视经济社会生活生产用水的合理配额和应急保障需求,有利于促进经济社会稳定发展。(4)以流域尺度水循环和地下水系统水平衡为基础,以地下水资源的数量评价及其补给、更新、储存和生态功能状况为主要依据,充分考虑现状超采不合理的影响,遵循地表水-地下水系统之间相互补给和转换的自然规律,兼顾地表水环境功能分区。(5)在兼有多种功能区域,实施优势功能合理利用与脆弱功能有力保护原则,尽可能实现多目标保护、多种功能互补和发挥地下水综合功能最佳功效。

3 干旱区地下水功能区划体系与属性指标特征

3.1 地下水功能区划体系架构 干旱区地下水功能区划体系由3类一级功能分区和8个亚类二级功能分区构成。一级功能分区分别为地下水适宜开采区、地下水生态功能保护区和地下水资源-生态脆弱区;二级功能分区分别为地下水规模开采区、地下水适量开采区、湿地保护区、植被保护区、泉水水源保护区、耕地质量保护区、地下水控制开采区和地下水禁止开采区。如表1所示。

3.2 地下水功能区划指标属性特征

3.2.1 一级区划指标属性特征 从表1可见,在干旱区地下水功能区划体系中,地下水功能一级区划分区由地下水适宜开采区、地下水生态保护区和地下水资源-生态脆弱区组成,它们的指标属性特征如下:

(1)地下水适宜开采区(记作“ B_1 ”类分区),它的指标属性是地下水功能综合指数($R_{综}$) ≥ 0.6 ,且同时满足地下水资源功能指数($R_{资}$)介于 $0.67 \sim 1.0$ 和地下水生态功能指数($R_{生}$) < 0.34 ,即地下水的资

表1 干旱区地下水功能区划指标体系

一级功能区		二级功能区			
分区名称	区划依据	分区名称	区划依据	属性特征	可利用性
地下水 适宜开采 区	$R_{综} \geq 0.6$; 且 $0.67 \leq R_{资} \leq 1.0$, $R_{生} < 0.34$	地下水适宜 规模开采区	C_1 -I, C_4 -II 或 C_1 -II, C_4 -I	资源占有性、资源可用性 强, 具有较强水源补给能 力	可规模开采, 适宜圈定水 源地
		地下水适宜 限量开采区	C_2 -I, C_3 -II 或 C_2 -II, C_3 -I	资源更新性、调节性强, 具 有较强水资源调节能力	可适量开采, 需强化补给 条件优化
地下水 生态功能 保护区	$R_{综} \geq 0.6$; 且 $0.67 \leq R_{生} \leq 1.0$, $R_{资} < 0.34$	自然湿地 保护区	C_5 -I 或 C_5 -II	湖泊湿地与地下水埋藏状况 关联性强, 具有较强生态 功能	不宜开采地下水, 需加强 生态水源补给保障
		泉水水源 保护区	C_5 -I 或 C_5 -II	泉水溢出数量或质量与地下 水埋藏状况关联性强, 具有 资源-生态景观双重功能	不宜规模开采地下水, 需 加强泉水水源敏感区域地 下水资源和环境保护
		天然植被 保护区	C_6 -I 或 C_6 -II	植被生态对地下水埋深具 有较强依赖性, 具有较强 生态功能	不宜规模开采地下水, 需 优先保障天然植被生态自 然保护区用水
		耕地质量 保护区	C_7 -I 或 C_7 -II	基本农田区耕地质量状况与 地下水埋深关联性较强, 具有较强生态功能	需合理调控潜水位埋深, 严控土壤盐渍化程度加 剧, 确保土地质量安全
地下水 资源-生态 脆弱区	$R_{综} < 0.6$, 且 $R_{资} < 0.67$, $R_{生} < 0.67$	地下水 控制开采区	C_1 -III, C_4 -III	资源占有性、资源可用性一 般, 但具有一定的水源补给 能力	可调节性开采, 主要服务 短期应急保障性供水
		地下水 禁止开采区	C_1 -IV, C_4 -V	资源占有性、资源可用性 弱, 生态环境敏感	不宜开采地下水, 需专注 生态功能保护和生态水源 保障

注: 表中 $R_{综}$ 为地下水功能综合指数、 $R_{资}$ 为地下水资源功能指数和 $R_{生}$ 为地下水生态功能指数; C_i 为地下水属性指标, 其中 C_1 为地下水资源占有性、 C_2 为地下水资源更新性、 C_3 为地下水资源调节性、 C_4 为地下水资源可用性、 C_5 为地下水景观环境性、 C_6 为地下水植被环境性和 C_7 为地下水土地环境性; I、II、... 为地下水属性质量状况等级, 其中 I 为好、II 为较好、III 为一般、IV 为较差和 V 为差)。

源功能较强、生态功能弱; 圈定区域的地下水系统在自然条件下补给水源充足、稳定, 富水性和渗透性较强, 水质优良, 地下水开发利用对自然湿地、天然植被等生态自然保护区地下水埋藏状况影响微小或无关联。

(2) 地下水生态功能保护区(记作“ B_2 ”类分区), 它的指标属性是地下水的 $R_{综} \geq 0.6$, 且同时满足地下水的 $R_{生}$ 介于 $0.67 \sim 1.0$ 和 $R_{资} < 0.34$, 即地下水的生态功能较强、资源功能弱; 圈定区域的地下水生态功能敏感, 地下水位持续、大幅变化会导致所在区域的自然湿地、天然植被或基本农田土地质量发生明显的响应变化, 包括自然湿地萎缩、天然植被生态显著退化或基本农田土壤盐渍化加剧。因此, 该区域地下水不宜大规模开采, 生态保护为主导。

(3) 地下水资源-生态脆弱区(记作“ B_3 ”类分区), 它的指标属性是地下水的 $R_{综} < 0.6$, 且同时满足地下水的 $R_{资} < 0.67$ 和 $R_{生} < 0.67$, 即地下水的资源功能和生态功能较弱, 都不占据地下水的优势功能区域; 圈定区域的地下水系统在自然条件下具有一定的水源补给能力, 但是, 地下水资源不具备规模化开采的承载能力, 同时, 该区域天然植被生态与地下水埋藏状况之间关联性微弱, 抵御气候干旱和人类活动影响的自我修复能力弱。

3.2.2 二级区划指标属性特征

(1) B_1 类分区指标属性特征。 B_1 类分区是指“地下水适宜开采区”一级区划下, 再根据地下水资源功能的资源占有性、资源调节性、资源更新性和资源可用性等指标属性特征而划分, 主要划分为地

下水适宜规模开采区(简称“可规模开采区”)和地下水适宜限量开采区(简称“适量开采区”)。

①地下水适宜规模开采区的指标属性特征,地下水资源功能的资源占有性强(记作 C_1-I)、资源可用性较强(记作 C_4-II),或者地下水资源功能的资源占有较强(记作 C_1-II)、资源可用性较强(记作 C_4-I);圈定区域的地下水具有较强的水源补给能力和较强可开发利用能力。

②地下水适宜限量开采区的指标属性特征,地下水资源功能的更新性强(记作 C_2-I)、资源调节性较强(记作 C_3-II),或者地下水资源功能的更新性较强(记作 C_2-II)、资源调节性强(记作 C_3-I);圈定区域的地下水具有较强的可更新能力和较强调节能力。

(2) B_2 类分区指标属性特征。 B_2 类分区是指“地下水生态功能保护区”一级区划下,再根据与地下水埋藏状况密切相关的不同生态环境类型,主要包括自然湿地、天然植被、农田土壤盐渍化程度和泉水水源等,划分为自然湿地(湖泊)保护区、泉水水源保护区、天然植被保护区和基本农田耕地质量保护区(简称“耕地质量保护区”)。

①自然湿地(湖泊)保护区的指标属性特征,自然湖泊-湿地生态状况与地下水埋藏状况关联性强或较强(记作 C_5-I 或 C_5-II),地下水生态功能强;圈定区域的地下水功能以生态功能为主导,地下水的生态位埋深对该区湿地水域面积及植被生态具有较强的维系作用。

②泉水水源保护区的指标属性特征,泉水溢出数量或质量与地下水埋藏状况关联性强或较强(记作 C_5-I 或 C_5-II),地下水资源功能和生态功能都强;圈定区域的地下水具有资源-生态景观双重功能,地下水位埋藏状况对泉水溢出数量及景观质量都具有较强的维系作用。

③天然植被保护区的指标属性特征,非自然湿地分布区的天然植被对地下水位埋深具有较强的依赖性(记作 C_6-I 或 C_6-II),地下水生态功能强;圈定区域的地下水功能以生态功能为主导,地下水的生态位埋深对该区天然植被生态具有较强的维系作用,包括干旱半干旱区的梭梭、白刺、柠条和柽柳等植被,这类保护区主要位于自然湿地外围区域的荒漠化区和人工绿洲与沙漠之间过渡带。

④耕地质量保护区的指标属性特征,主要是指分布在自然湿地分布区周边的基本农田所在范围,由于地下水位浅埋而土壤盐渍化加剧,由此该区域的耕地质量对地下水位埋深具有较强的依赖性(记作 C_7-I 或 C_7-II),地下水生态功能强;圈定区域的地下水功能以生态功能为主导,地下水位浅埋对对该区耕地质量具有负面作用,水位过浅、土壤盐渍化程度升高。因此,需合理调控地下水位埋深,严控土壤盐渍化程度加剧,确保土地质量安全。

(3) B_3 类分区指标属性特征。 B_3 类分区是指“地下水资源-生态脆弱区”一级区划下,再根据地下水资源的占有性、可用性和生态关联性属性状况,划分为地下水控制开采区(简称“控采区”)和禁止开采区(简称“禁采区”)。

①地下水控制开采区的指标属性特征,地下水资源功能的资源占有性和资源可用性都“一般”(记作 C_1-III 、 C_4-III),地下水生态功能也“一般”;圈定区域的地下水具有一定的水源补给能力,可调节性开采,主要服务短期应急保障性供水。

②地下水禁止开采区的指标属性特征,地下水资源功能的资源占有性较差(记作 C_1-IV)和资源可用性差(记作 C_4-V),地下水生态功能较差;圈定区域的地下水不宜开采,需专注生态功能保护。

4 干旱区地下水功能区划实现方法

通过“干旱半干旱区地下水功能评价与区划理论方法”的评价,最终获得基于剖分网格精度(例如 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$)的全区域地下水综合功能评价综合指数($R_{综}$)、资源功能评价指数($R_{资}$)、生态功能评价指数($R_{生}$)和7个属性指标评价等级结果,包括地下水资源占有性、资源更新性、资源调节性和资源可用性,以及地下水对景观环境维持性、对植被环境维持性和对土地环境维持性;然后,应用MapGIS空间特征分析技术,编绘上述10项评价成果区域空间分布图,这些图都是按照统一的规范和分级标准(5个等级),展现评价区地下水的资源功能、生态功能、综合功能和7项属性状况的区域分布特征,构成地下水功能区划的基础和圈定分区的科学依据。

在上述10幅成果图及其数据库支撑下,主要依据干旱区地下水功能区划分原则、 $R_{综}$ 成果数据和区划指标体系(表1),编制评价区地下水功能区划结果图。在西北内陆各流域的不同区带, $R_{综}$ 耦合了资源功能、生态功能和7个属性指标的状况。换言之,评价区的 $R_{综}$ 内涵由7个属性指标分别表征,然后分别由资源功能和生态功能集合表达,最终两项功能有机耦合,构成地下水综合功能状况($R_{综}$)。虽然数万个评价(剖分)单元的 $R_{综}$ 值千姿百态、内涵千差万别,但是,都集中介于地下水功能评价规范的5个等级之内。

在上述研究基础上,依据地下水的 $R_{资}$ 和 $R_{生}$ 评价结果,结合 $R_{综}$ 进行一级地下水功能区划;然后,在地下水资源功能的主导优势(即 $R_{资} \geq 0.67$)区域内,依据地下水资源占有性、资源更新性、资源调节性和资源可用性的评价结果,进行 B_1 类二级功能区划;在地下水生态功能的主导优势(即 $R_{生} \geq 0.67$)区域内,依据地下水对景观环境维持性、对植被环境维持性和对土地环境维持性的评价结果,进行 B_2 类二级功能区划;在地下水资源功能、生态功能的非优势(即 $R_{资}$ 和 $R_{生} < 0.67$)区域内,依据7项属性指标状况的评价结果,进行 B_3 类二级功能区划。由此,初步完成一个流域的地下水功能区划。

下一步,进行地下水功能区划的实地效验和完善,重点核查地下水功能区划的分界和重要保护区划分范围的客观符合性。野外实地效验之前,需设计控制性验证路线、重点验证点,尤其在流域上、中游区段,一般为人工绿洲区, $R_{综}$ 评价结果的等级普遍较高、 $R_{生}$ 评价结果的等级较低;在下游区段, $R_{综}$ 评价结果的等级普遍较高、 $R_{资}$ 评价结果的等级较低。实地效验中,务必将7幅属性指标评价成果图带到现场,验证中不可或缺。因为在西北内陆各主要流域,自上游山区至下游的自然湿地分布区,不仅地貌、植被生态和地下水埋藏状况分带强,而且,土壤类型、水文和水文地质条件分带特征也十分明显,加之,以河道为条带的相变影响,二级地下水功能分区验证需要更深入。

最后,结合野外实地验证情况,并参考当地主管部门的技术要求,进行地下水功能区划成果图的勘误、完善和定稿,编制《XYZ流域地下水功能区划及其应用说明书》。

5 干旱区地下水功能区划应用实例

本文中的干旱区地下水功能区划应用验证区域,选择在西北内陆石羊河流域,以其中游的武威盆地和下游的民勤盆地作为主要研究区,研究区总面积8170 km²。

基于上述区划方法,获得石羊河流域地下水功能区划成果,如图2所示。其中,一级功能区划的 B_1 类(地下水适宜开采区)分区面积2500 km²,占研究区总面积的30.60%; B_2 类(地下水生态功能保护区)分区面积1054 km²,占研究区总面积的12.90%; B_3 类(地下水资源-生态功能脆弱区)分区面积4616 km²,占研究区总面积的56.50%。 B_1 类功能保护分区主要位于评价区南部的祁连山前冲积扇带,为由巨厚砂卵砾石层组成的强补给径流分布区,出山地表径流的河水和夏季雨洪漫流是地下水的主要补给水源,植被生态以人工绿洲为主,与地下水埋藏状况之间关联性不强。 B_2 类功能保护分区主要位于武威盆地和民勤盆地的下游区和盆地边缘地区,包括青土湖自然湿地保护区、石羊河湿地保护区、冲洪积扇缘与细土平原交接处的泉水溢出水源保护区,以及邻近湿地保护区的农田耕地质量保护区,这些区域的生态系统对地下水(潜水)位埋深状况普遍依赖性较强,每当地下水位长时间、大幅升降变化,这些生态系统都会呈现明显的响应变化。 B_3 类功能保护分区主要分布在人工绿洲区、荒漠区和人工绿洲-荒漠区过渡区带,它们的外围是巴丹吉林沙漠或腾格里沙漠区。

在 B_1 类(地下水适宜开采区)一级功能区,二级功能区划结果,分别为地下水规模开采区面积1471 km²,占该功能区面积的58.84%;地下水适量开采区面积1029 km²,占41.16%。在 B_2 类(地下水生态功能保护区)一级功能区,二级功能区划结果,分别为自然湿地保护区面积118 km²,占该功能区面积的11.20%;天然植被保护区面积510 km²,占48.39%;泉水水源保护区面积101 km²,占9.58%;耕地质量保护区面积325 km²,占30.83%。在 B_3 类(地下水资源-生态功能脆弱区)一级功能区,二级功能区划结果,分别为地下水控采区面积2372 km²,占该功能区面积的51.39%;地下水禁

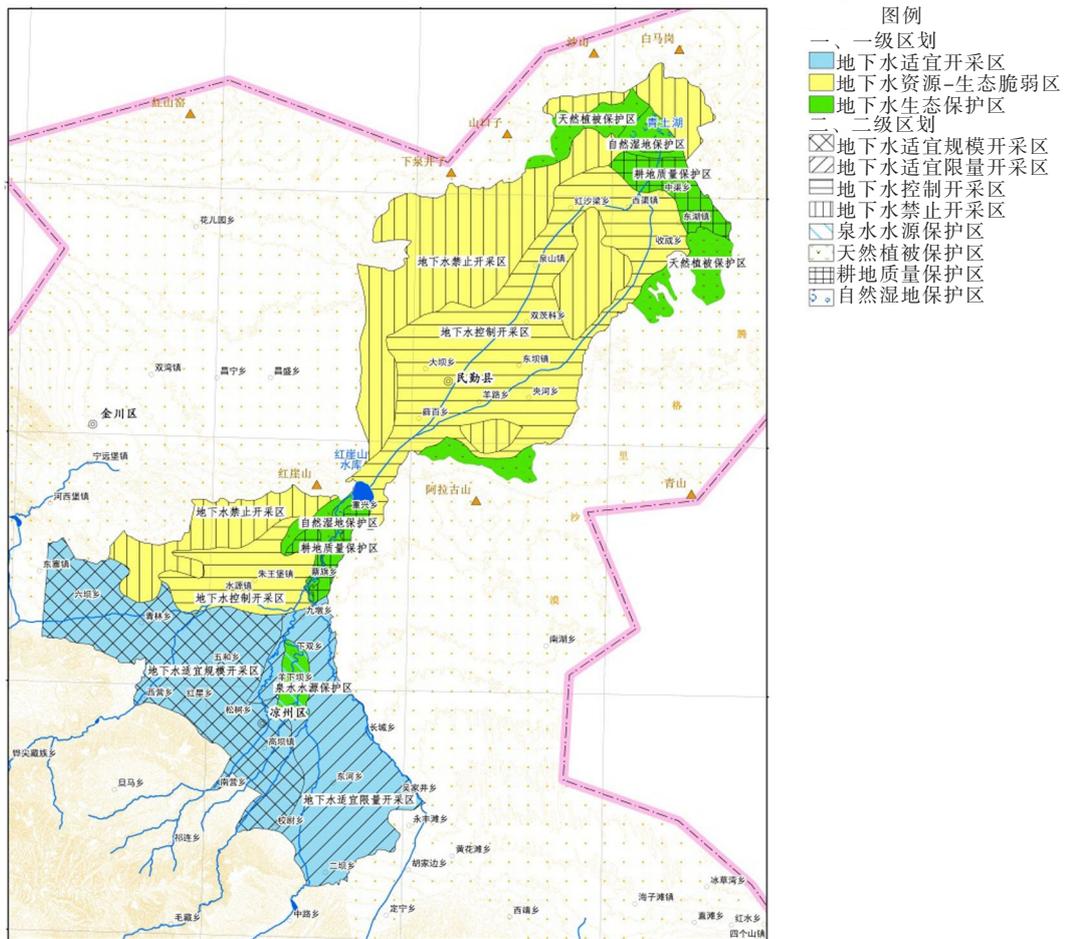


图2 石羊河流域地下水功能区划特征

止开采区面积 2244 km²，占该功能区面积的 48.61%。地下水规模开采区和适量开采区主要分布在山前补给地带，该区的东部地下水补给能力略弱；自然湿地保护区、天然植被保护区、耕地质量保护区和泉水水源保护区，主要分布在下游区和盆地的边缘地区；地下水控采区位于盆地中部的人工绿洲区，地下水系统具有一定的补给能力，但目前仍处于灌溉用水开采引起的中等超采状态；地下水禁采区位于盆地的西北荒漠区，地处地下水生态功能脆弱区域(图 2)，以生态功能保护为主。

6 结论

综上所述，基于本科研团队研发的“干旱区地下水功能评价与区划理论方法”及其在石羊河流域应用效验结果，适宜西北内陆区地下水功能区划的体系指标属性具有如下特征：(1)以流域尺度为研究单元，高度重视了在中、下游区及其不同区带的地下水位埋深变化对生态环境维持作用，增设了“湿地环境与地下水关联度”“湖泊泉补与地下水关联度”“绿洲覆盖与地下水关联度”和“土地荒漠化与地下水关联度”等生态功能的属性指标。(2)立足于地下水自然属性，兼顾长期人为因素影响下的社会属性和生态环境维持能力，以及保护优先与合理开发并重的原则，突出了尽可能实现多目标保护、多种功能互补的宗旨。(3)干旱区地下水功能区划体系由 3 类一级功能分区和 8 个亚类二级功能分区构成。它依据地下水的资源占有性、更新性、调节性、可用性和自然湿地与天然植被等生态关联性，划分了二级功能保护分区。(4)在西北内陆石羊河流域应用效验，结果符合当地地下水赋存条件和功能状况。其中，一级功能区划的 B₁ 类面积占研究区总面积的 30.60%、B₂

类面积占 12.90% 和 B_3 类面积占 56.50%。在 B_1 类一级功能区内, 地下水规模开采区面积占该功能区面积的 58.84%、适量开采区面积占 41.16%; 在 B_2 类一级功能区内, 自然湿地保护区面积占该功能区面积的 11.20%、天然植被保护区面积占 48.39%、泉水水源保护区面积占 9.58% 和耕地质量保护区面积占 30.83%。

参 考 文 献:

- [1] 王浩, 秦大庸, 王研, 等. 西北内陆干旱区生态环境及其演变趋势[J]. 水利学报, 2004(8): 8-14.
- [2] 刘金鹏, 费良军, 南忠仁, 等. 基于生态安全的干旱区绿洲生态需水研究[J]. 水利学报, 2010, 41(2): 226-232.
- [3] 李丽琴, 王志樟, 贺华翔, 等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 377-387.
- [4] 张光辉, 刘少玉, 谢悦波, 等. 西北内陆黑河流域水循环与地下水形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [5] 武选民. 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.
- [6] 陆垂裕, 孙青言, 李慧, 等. 基于水循环模拟的干旱半干旱地区地下水补给评价[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 701-711.
- [7] 宋冬梅, 肖笃宁, 张志诚, 等. 石羊河下游民勤绿洲生态安全时空变化分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 336-342.
- [8] 纪永福, 俄有浩, 杨自辉, 等. 民勤盆地生态功能类型区划分与生态用水分析[J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 10-14.
- [9] 孙月, 毛晓敏, 沈清林, 等. 石羊河流域地下水埋深时空变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 562-569.
- [10] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493.
- [11] 吴斌, 王赛, 王文祥, 等. 未来气候变化对西北干旱区水资源影响研究[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 369-380.
- [12] 汪林, 甘泓, 于福亮, 等. 西北地区盐渍土及其开发利用中存在问题的研究[J]. 水利学报, 2001(6): 90-94.
- [13] 李山, 罗纨, 贾忠华, 等. 灌区地下水控制埋深与利用量对洗盐周期的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 950-957.
- [14] 陈敏健, 王浩, 王芳, 等. 内陆河干旱区生态需水分析[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2137-2142.
- [15] 张光辉, 聂振龙, 王金哲, 等. 区域地下水功能及可持续利用性评价理论与方法[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(4): 62-66, 71.
- [16] 张光辉, 严明疆, 杨丽芝, 等. 地下水可持续开采量与地下水功能评价的关系[J]. 地质通报, 2008(6): 875-881.
- [17] 唐克旺, 唐蕴, 李原园, 等. 地下水功能区划体系及其应用[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1349-1356.
- [18] 孙晋炜, 刘培斌, 李国敏. 地下水功能区划方法研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 44-46.
- [19] 唐蕴, 王妍, 唐克旺. 吐鲁番市浅层地下水功能区划分[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 16-21.
- [20] 聂振龙, 张光辉, 王金哲, 等. 西北内陆盆地地下水功能特征及地下水可持续利用[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 63-66.
- [21] 张光辉, 杨丽芝, 聂振龙, 等. 华北平原地下水的功能特征与功能评价[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 368-374.
- [22] 张光辉, 聂振龙, 王金哲, 等. 地下水功能评价体系属性层组成与意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 61-65.
- [23] 聂振龙, 张光辉, 王金哲, 等. 地下水功能评价可视化平台的开发及应用[J]. 地球学报, 2007(6): 579-584.

System index attribute and application of groundwater function zoning in northwest inland area of China

WANG Jinzhe^{1, 2}, ZHANG Guanghui¹, CUI Haohao¹, WANG Qian¹, DONG Haibiao¹, HAO Jing¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China;

2. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: The natural wetland and natural vegetation in the northwest inland plain of China are strongly dependent on the groundwater table, the groundwater function zoning is urgently needed, in order to strengthen the ability of “water level–water volume” control of groundwater. Aimed at the demand of how to determine the ecological function protection area, the basic farmland quality protection area and the exploitable resources function area of groundwater in the middle and lower reaches plain areas of the inland basins in Northwest China, based on the newly established theory and method of groundwater function evaluation and regionalization in arid and semi-arid area, this paper expounds attribute composition, characteristics, connotation, regionalization principles and methods of the system suitable for groundwater function regionalization in northwest inland area. The Application results in the Shiyang River basin show that, the area of class B₁, class B₂ and B₃ are 30.60%, 12.90% and 56.50% respectively. In the first grade function area of category B₁, the area of groundwater extraction on a large scale accounts is 58.84%, and the area of appropriate extraction accounts is 41.16%, the area of natural wetland protection area in the first grade functional area of B₂ type is 11.20%, the area of natural vegetation protection area is 48.39%, the area of spring water source protection area is 9.58%, and the area of cultivated land quality protection area is 30.83%. The results accord with the conditions and functions of local groundwater, which is beneficial to the most strict “water level–water quantity” double control management.

Keywords: the north–west inland plain; groundwater; functional zoning; attribute connotation

(责任编辑: 韩 昆)

(上接第 795 页)

Hydraulic performance optimization of the ultra narrow union pumping forebay: a case study

FU Hui¹, NIU Huasi², MAO Yujia², YANG Ruobing², GUO Xinlei¹, SHI Chunrong¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. China Nuclear Power Engineering Company Limited, Beijing 100840, China)

Abstract: As an important part of the circulating water system, the pumping forebay of the thermal and nuclear power plant is related to the stability, safety and efficient operation of the whole system. In this paper, the ultra narrow union pumping forebay of a nuclear power plant was taken as the research object. The forebay had an aspect ratio of 0.193–to–one and a single inlet, and the inlet diffusion angle was 180°. Through the systematic experiments with different methods and multiple flow conditions, the hydraulic performance optimization scheme which was consist of the semi-circular diffusion pier and the suspended diaphragm was proposed. On the basis of not greatly changing the original design scheme, the turbulence of water body, backflow height and strong return area in the pumping forebay were all eliminated, the uniformity of flow velocity distribution at the sections of the flow passages was improved, the vortex strength at the water surface in the inlet sump was also reduced. The research results can provide reference for the design and hydraulic performance optimization of pumping forebay of similar thermal and nuclear power plant.

Keywords: pump station; forebay; hydraulic performance; velocity distribution; backflow; power plant

(责任编辑: 李福田)