

西北干旱区地下水生态功能评价指标体系构建与应用

王金哲^{1,2)}, 张光辉¹⁾, 王茜¹⁾, 崔浩浩¹⁾, 刘鹏飞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

内容提要:西北干旱区降水稀少、蒸发强烈, 水资源紧缺, 自然湖泊湿地、天然植被绿洲和土壤盐渍化程度对地下水生态水位具有强烈依赖性, 因此, 西北干旱区地下水生态功能评价指标体系构建成为一个重要课题。本文基于对干旱区不同类型生态状况与地下水位埋深之间关系的机制研究, 构建了以浅层地下水埋藏状况为核心要素的“西北干旱区地下水生态功能评价指标体系”, 它由地下水对自然湿地景观维持性、天然植被绿洲维持性、农田土地质量维持性及其隶属的6项要素指标构成; 在石羊河流域中、下游平原区应用结果表明, 该套指标体系可为西北干旱区地下水功能评价提供参考, 同时还表征石羊河流域中、下游平原区地下水生态功能脆弱, 生态功能较弱和弱的分布范围占示范应用区总面积的87.86%, 地下水生态功能强、较强分布范围仅占5.07%。由此可见, 进一步提高西北干旱区地下水生态功能保护能力刻不容缓。

关键词: 干旱区; 地下水; 生态功能; 指标体系; 自然湿地; 荒漠化

在我国西北内陆干旱半干旱地区(简称“西北干旱区”), 地下水具有独特的维系自然湿地、天然植被绿洲和农田土地质量等生态系统的功能, 记作“生态功能”。一旦地下水位埋深过大或过浅, 可能造成大范围土地荒漠化、沙漠化或农田土壤盐渍化等生态环境灾害。因此, 西北干旱区地下水生态功能评价指标体系构建及指标形成机制研究, 成为重要前沿课题。目前, 见于诸期刊提到的地下水生态功能概念有2种, 一种为“地下水生态功能是指地下水系统对陆表植被、湖泊、湿地和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, 则生态环境出现相应的响应改变。”(Zhang Guanghui et al., 2009), 另一种为“地下水的生态功能是指地下水在参与自然界水循环过程中与周围环境进行物质和能量交换, 对生态环境修复与改善的支持力”(Wang Wenke et al., 2018)。虽然它们提法不完全相同, 但内涵一致, 即地下水生态功能是指原位态地下水

在维持自然湖泊湿地规模、提供植被生态需水保障、控调农田土壤含盐量等方面所发挥的作用或效应。

由于西北干旱区降水稀少、蒸发强烈, 平原区地下水埋藏状况成为自然湖泊湿地、天然植被绿洲、泉水溢出景观和农田土壤盐渍化的关键基础条件, 这些生态系统对浅层地下水(潜水)水位埋深及其支持毛细供水能力具有强烈依赖性(Qu Yaoguang et al., 1991; Wang Hao et al., 2004; Liu Jinpeng et al., 2010)。当潜水水位埋深过大时, 则生态系统需水就会失去地下水供给, 较长时间失去水源保障, 必然引起自然湿地、天然植被严重退化和泉水溢出景观消失等问题(Chen Zongyu et al., 2004; Zhang Guanghui et al., 2006a; Zhang Fawang et al., 2006); 当潜水水位埋深过浅时, 则会加剧陆表蒸发土壤盐分浓缩作用, 较长时间土壤盐分浓缩增加, 必然引起严重土壤盐渍化, 破坏土地生态环境生产力(Guo Zhanrong, 2000; Qiao Xiaoying et al., 2005;

注: 本文为国家重点研发计划课题(编号2017YFC0406106)、国家专项基本科研业务费重大创新研究项目(编号JYYWF20180403)和国家青年基金项目(编号41807217)联合资助的成果。

收稿日期: 2020-06-18; 改回日期: 2020-11-23; 网络发表日期: 2021-03-01; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 黄敏、潘静。

作者简介: 王金哲, 女, 1969年生。教授级高工, 主要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, 男, 1959年生。二级研究员, 博导, 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。

引用本文: 王金哲, 张光辉, 王茜, 崔浩浩, 刘鹏飞. 2021. 西北干旱区地下水生态功能评价指标体系构建与应用. 地质学报, 95(5): 1573~1581, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021068.
Wang Jinzhe, Zhang Guanghui, Wang Qian, Cui Haohao, Liu Pengfei. 2021. Construction and application of evaluation index system of groundwater ecological function in northwest arid area. Acta Geologica Sinica, 95(5): 1573~1581.

Huang Jinou et al., 2017)。在西北干旱区,水资源总量十分有限(Fan Xipeng, 1962),地下水补给主要依赖上游出山地表径流补给,也存在长期与中游区经济社会用水之间的矛盾,难以确保中下游所有区域生态需水和经济社会用水的基本要求,有所为、有所不为是必然的抉择。究竟哪些区域应作为生态主导功能,严加以保护,需要科学地进行地下水生态功能评价与区划。面临难题是如何构建适宜我国西北干旱区的地下水生态功能评价指标体系,这些评价指标内涵及形成机制如何,需科学研究确定。

截止目前,有关西北干旱区地下水生态功能指标具体评价方法和划分标准尚未有相关研究成果报道。Zhang Guanghui et al. (2006b)曾于 2006 年面向我国北方地区,提出地下水生态功能评价与区划理论方法,包括景观环境维持性、水环境关联性、植被环境维持性和土地环境关联性等 10 项评价指标,适宜东北地区、华北平原等大区域地下水生态功能评价与区划,不适宜于流域内地下水功能高分区工作。Yang Zeyuan et al. (2006a)对于旱半干旱区地下水引起的表生生态效应进行研究,建立了以地质地貌因素、水文地质因素和气象水文要素为准则层、集合 11 个要素指标的评价指标体系); Qiao Xiaoying et al. (2005)、Yang Zeyuan et al. (2009)、Wang Wenke et al. (2011, 2018)从可持续发展角度探讨了地下水的生态功能。Jin Xiaomei et al. (2007, 2010)分析了银川平原和额济纳旗盆地不同地下水位埋深与天然植被生长状况关系, Cui Yali et al. (2005)、Guo Zhanrong et al. (2005)和 Yang Zeyuan et al. (2006b),研究了干旱区植被生长状况与地下水位埋深关系, Zhang Huichang (1992)、Zhang Changchun et al. (2003)和 Fan Zili et al. (2004),研究了荒漠化程度、土壤盐渍化与地下水位埋深之间的关系,为本研究提供了重要参考依据。

本研究依托国家重点研发计划项目“我国西部特殊地貌区地下水合理开发与生态功能保护”(2017~2021 年)的有关课题数据、资料和成果,构建了以石羊河流域为研究基础,同时参考西北地区相关研究成果的以浅层地下水位埋深为核心要素的地下水生态功能评价指标体系,并进行了示范应用。研究成果对于西北地区与地下水相关的生态功能评价工作具有参考作用,既可评价湿地(湖沼泉补)、天然植被、土壤盐渍化和荒漠化等不同生态指标状况,亦可评价不同生态指标叠加作用下的整体生态功能状况,评价结果有助于指导当地部门对不同区位的地

下水进行针对性、合理性管控。

1 干旱区地下水生态功能评价指标体系

地下水生态功能是地下水功能的一部分。地下水功能是由驱动因子群、状态因子群和响应因子群组成的“驱动-状态-响应”体系,其中地下水生态功能的表征因子为响应因子群(Wang Jinzhe et al., 2008),西北干旱区地下水埋藏状况变化所引起地表生态效应,主要表现为自然湖泊湿地萎缩、天然植被退化或消亡、土地荒漠化和土壤盐渍化等,具体表征和描述这些生态效应的要素,包括湖泊湿地面积、天然植被覆盖度、泉溢出流量、土地沙化和土壤盐渍化程度等。地下水水质对地表生态也有一些影响,但总体来看,地下水位埋深对不同生态要素的影响更为关键,例如湖泊湿地面积、泉流量与水质无关,地下水位埋深较浅、水质较差的区域有适应其环境的盐爪爪生长。因此,指标体系构建时选取的核心要素为地下水位埋深。

西北干旱区地下水生态功能评价指标体系,由功能层(A)、属性指标层(B)和要素指标层(C)三个层次指标构成,共计 10 项指标(图 1)。其中,地下水生态功能要素指标以上述生态效应的要素与地下水位埋深之间关联度进行表达刻画,采用多项因子组合、复合表达形式构成“要素指标层(C)”,分别为湿地环境与地下关联度、湖泊泉补与地下水关联度、天然植被与地下水关联度、绿洲覆盖与地下水关联度、土地荒漠化与地下水关联度和土壤盐渍化与地下水关联度 6 项指标(表 1)。

西北干旱区地下水生态功能评价属性指标层是由要素指标层的指标分类集合而构成,从不同侧面反映地下水生态功能的某一属性状况,分别为地下水对自然湿地景观维持性、地下水对天然植被绿洲维持性和地下水对农田土地质量维持性 3 项评价指标(图 1 和表 1)。

2 干旱区地下水生态功能要素评价指标等级与划分机制

不同层级或同一层级的各指标状况,因为它们与地下水生态功能之间关系呈现的规律各不相同,其等级评价方法也不同。

2.1 地下水对自然湿地景观维持性要素评价指标

地下水对自然湿地景观维持性评价指标(B_1^1)由湿地环境与地下水关联度(C_1^1)、湖泊泉补与地下水关联度(C_1^2)构成。在西北干旱区,湖泊湿地和泉

表 1 西北干旱区地下水生态功能评价指标体系组成及指标内涵

Table 1 Composition and connotation of evaluation index system of groundwater ecological function in arid area of northwest China			
主导功能层及代码	属性性状层及代码	要素指标层	
		要素指标及代码	指标内涵
地下水生态功能 A	地下水对自然湿地景观维持性 B_1^1	湿地环境与地下水关联度 C_1^1	是指评价分区湿地环境(面积)状况与同期浅层地下水位变化之间关联度
		湖泊泉补与地下水关联度 C_2^2	是指评价分区湖泊环境(水深或面积)状况与同期浅层地下水通过泉水溢出补给状况的关联度
	地下水对天然植被绿洲维持性 B_2^2	天然植被与地下水关联度 C_3^3	是指评价分区的天然植被生长状况与同期浅层地下水位变化之间关联度
		绿洲覆盖与地下水关联度 C_4^4	是指评价分区天然绿洲覆盖率状况与同期浅层地下水位变化之间关联度
	地下水对农田土地质量维持性 B_3^3	土地荒漠化与地下水关联度 C_5^5	是指评价分区土地荒漠化程度与同期浅层地下水位变化之间关联度
		土壤盐渍化与地下水关联度 C_6^6	是指评价分区的土壤盐渍化状况与同期浅层地下水位变化之间关联度

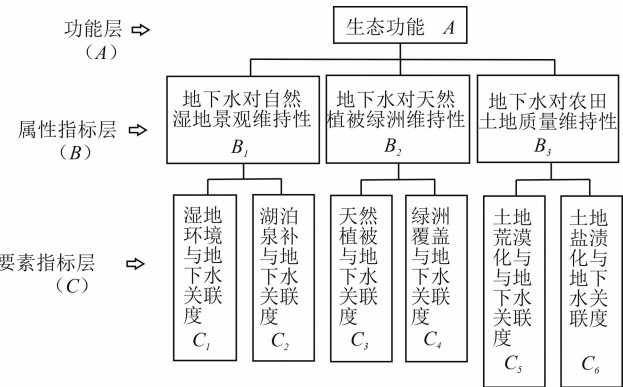


图 1 西北干旱区地下水生态功能评价指标体系架构
Fig. 1 Evaluation index system of groundwater ecological function in arid area of northwest China

水溢出带分别分布于流域(盆地)下游的尾闾区和中游的细土平原前缘带。例如黑河流域的居延海、石羊河流域的青土湖,以及张掖盆地、武威盆地的泉水溢出带生态景观等。尾闾湖区水源主要源自中、上游区地表径流补给,形成在下游尾闾湖区自然湖泊湿地,与地下水生态水位之间形成互为补给关系。当地表径流补给水量丰沛时,潜水位上升,埋深减小,湖泊湿地面积扩展;当地表径流补给水量偏枯或长时间断流时,潜水位大幅下降,埋深增大,湖泊湿地面积萎缩或消亡,如青土湖湿地面积与浅层地下水位埋深之间关系(图 2),当湿地监测点潜水位埋深大于 3.7 m 时,湿地几近消失;埋深小于 2.0 m 时,湿地面积超过 55 km²。泉水溢出带生态景观也同理,潜水位高,埋深小,泉水溢出流量大,泉水溢出带生态景观范围扩展;反之,泉水溢出带生态景观范围萎缩或消失,如石羊河中游泉水溢出带(图 2),监测点浅层地下水位埋深大于 2.4 m 时,泉水流量小于 1.2 m³/a;埋深小于 2.4 m 时,泉水流量大于 2.0 m³/a。

基于上述要素指标呈现的机制,在西北干旱区地下水生态功能评价时,将湿地环境与地下水关联度、湖泊泉补与地下水关联度等指标的评价等级划分为 5 级。下游尾闾湖区的湖泊湿地分布区、中游的泉水溢出带,且潜水水位埋深小于、等于相应生态水位埋深时,评价等级为“强”;其它地区为“弱”。下游尾闾湖区的湖泊湿地分布区、中游的泉水溢出带,且潜水水位埋深大于相应生态水位埋深时,根据潜水水位埋深大于“生态水位”的程度,分别划分为“较强”、“一般”和“较弱”等。其中,“强”为地下水生态功能处于正常状态;“较强”为在短期(不大于 3a)人工调控可修复正常生态功能;“一般”为在短期需要大力投入条件下人工调控可修复正常生态功能;“较弱”为在短期需要大力投入条件下人工调控可局部修复生态功能;“弱”为在短期即使大力投入条件下也难以人工调控修复正常生态功能。

2.2 地下水对天然植被绿洲维持性要素评价指标

地下水对天然植被绿洲维持性指标(B_2^2)由天然植被与地下水关联度(C_3^3)、绿洲覆盖度与地下水关联度(C_4^4)构成。天然植被与地下水关联度、绿洲覆盖度与地下水关联度分别表示天然植被生长状况和植被覆盖状况响应地下水位变化的生态情势,其中天然植被生长状况采用归一化植被指数(NDVI)指数表达。西北干旱区天然植被生长状况及其覆盖率都与潜水(地下水)水位埋深密切相关。例如在石羊河流域民勤盆地,选择该区 2016 年人工绿洲外围过渡带天然植被生长状况、绿洲覆盖与地下水位埋深之间关系进行分析,呈现 5 个阶段特征(图 3、图 4)。

当地下水位埋深介于 1.0~3.2 m 之间,则 NDVI 指数、植被覆盖度都明显扩增,它们与地下水

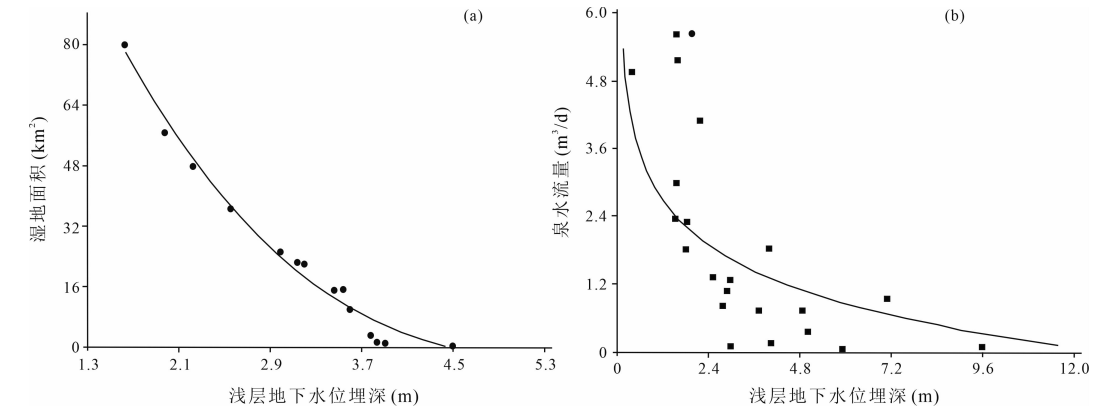


图 2 石羊河流域湖泊湿地面积(a)和泉水流量(b)与地下水位埋深之间相关关系

Fig. 2 Correlation among lake wetland area (a), spring water flow (b) and groundwater table depth in Shiyang River basin

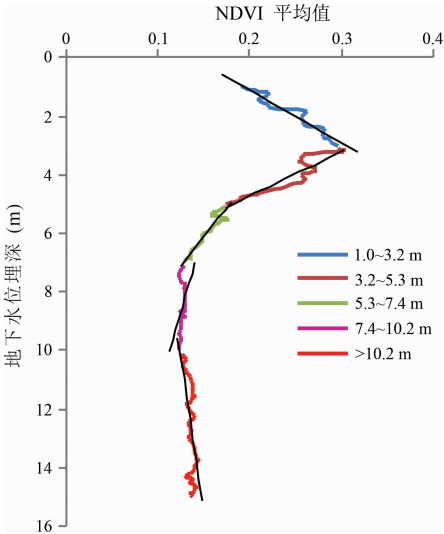


图 3 石羊河流域地下水位埋深与植被 NDVI 关系

Fig. 3 Relationship between groundwater table depth and NDVI of vegetation in Shiyang River basin

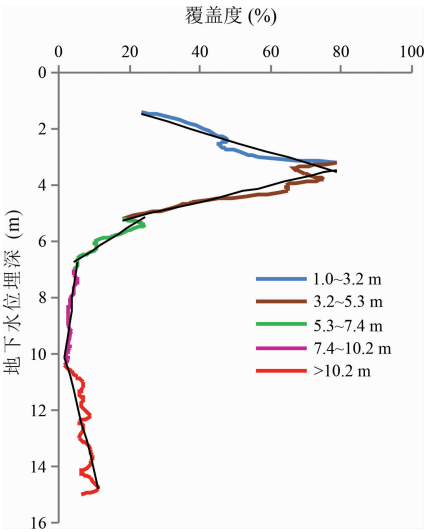


图 4 石羊河流域地下水位埋深与植被覆盖度关系

Fig. 4 Relationship between groundwater table depth and vegetation coverage in Shiyang River basin

位埋深之间呈正相关。在地下水生态水位范围内,随着水位埋深增大,NDVI 指数和植被覆盖度增大,地下水位埋深每增加 1 m,NDVI 指数增加 0.05 和植被覆盖度增加 17.27%。当地下水位埋深大于 3.2 m 时,NDVI 指数、植被覆盖度呈现峰值和拐点,表明 3.2 m 为适宜于该区植被生长的地下水生态水位埋深(简称“适宜生态水位”)。当地下水位埋深介于 3.2~5.3 m 之间时,则 NDVI 指数、植被覆盖度呈明显消减状态,它们与地下水位埋深之间呈负相关,天然植被仍然呈现较好的生长状态景观,但地下水对高秆芦苇等部分植被生态状况表现出失效影响。当地下水位埋深介于 5.3~7.4 m 之间时,则 NDVI 指数、植被覆盖度呈现持续减小特征,它们与地下水位埋深之间呈负相关,甘草和矮干芦苇等部分植被物种出现枯萎死亡现象。当地下水

位埋深介于 7.4~10.2 m 之间时,则 NDVI 指数、植被覆盖度呈现缓慢减小特征,它们仍与地下水位埋深之间呈负相关,骆驼刺、胡杨、沙枣、红柳等天然植被系统整体上呈现不良生长状态。当地下水位埋深>10.2 m 时,则 NDVI 指数、植被覆盖度与地下水位埋深之间相关性消失,以至 10.2 m 成为该区的“极限生态水位”。

基于在石羊河流域等监测研究数据,综合考虑西北内陆地区相关成果^①(Guo Zhanrong et al., 2005a; Jin Xiaomei et al., 2007; Wang Chunfeng, 2007; Jin Xiaomei et al., 2010a; Yang Zeyuan et al., 2006a),以 ArcGIS 为处理平台,获取每个研究单元(遥感解译像元)的植被 NDVI、覆盖度和地下水位埋深数据;按照地下水位埋深间隔为 0.1 m,植被 NDVI 和覆盖度的像元栅格 30 m×30 m(研究单

元),统计单元地下水位埋深对应的植被 NDVI 均值和覆盖度均值,然后,通过散点图方法建立植被 NDVI 与地下水位埋深、植被覆盖度与地下水位埋深之间相关关系。在此基础上,依据植被 NDVI 和覆盖

度(作为变量)随地下水位埋深变化的相应状况,主要考虑 2 个变量响应地下水位变化的程度和正负效应,进行西北干旱区天然植被与地下水关联度、绿洲覆盖与地下水关联度的评价等级划分(表 2)。

表 2 西北干旱区天然植被生长状况和覆盖度与地下水位埋深之间关联度的评价等级划分标准

Table 2 Standard for classification of correlation degree between growth status and coverage of natural vegetation and groundwater level in arid area of northwest China					
地下水位埋深分级(m)	0~3	3~5	5~7	7~10	>10
天然植被与地下水之间关联度	强	较强	一般	较弱	弱
植被覆盖度与地下水之间关联度	强	较强	一般	较弱	弱

2.3 地下水对农田土地质量维持性要素评价指标

地下水对农田土地质量维持性评价指标(B_3^3)由土地荒漠化与地下水关联度(C_1^5)、土壤盐渍化与地下水关联度(C_1^6)构成。由于这两项指标彼此为逆向关系,所以,这里分别介绍它们等级划分机制和结果。

2.3.1 土地荒漠化与地下水关联度

土地荒漠化与地下水关联度采用土地沙化程度与地下水位埋深之间关系进行表达。在石羊河流域民勤盆地,非荒漠化分布区集中出现在地下水位埋深 2~4 m 范围,轻度荒漠化地带集中出现在水位埋深 4~6 m 范围,中度荒漠化地带集中出现在水位埋深 7~10 m 范围,重度荒漠化地带集中出现在水位埋深 10~14 m 范围和极重度荒漠化地带集中出现在水位埋深 11~16 m 范围(表 3)。

石羊河流域,以及塔里木河流域^①和新疆阿克苏地区(Zhao Huiqin,2003)的土地荒漠化与地下水位埋深之间关系表明,在西北干旱区不同流域非沙漠化、轻度和中度沙漠化与地下水位埋深之间关系的对应规律基本一致。因此,综合考虑上述三个地区调查和监测结果,并依据“第四次全国荒漠化和沙化监测技术规定 090415”技术要求,将西北干旱区土地沙化程度与地下水位埋深之间相关度的评价等级划分为五级,分别为非荒漠化和轻度、中度、重度、极重度荒漠化(表 4)。

2.3.2 土壤盐渍化与地下水关联度

依据“生态功能区划暂行规程”(2005),土壤盐渍化状况分别为:非盐渍化土壤的易溶盐含量<0.4%,轻度盐渍化土壤的易溶盐含量介于 0.4%~0.8%之间,中度盐渍化土壤的易溶盐含量介于 0.8%~1.2%之间,强度盐渍化土壤的易溶盐含量介于 1.2%~2.0%之间,盐土级土壤的易溶盐含量>2.0%。通过在石羊河流域武威盆地和民勤盆地进行土壤盐渍化程度与地下水位埋深之间关系的调

表 3 石羊河流域下游区土地荒漠化与地下水位埋深之间关系

Table 3 Relationship between desertification and groundwater table depth in the lower reaches in Shiyang River basin

地下水位埋深(m)	不同荒漠化程度的占比率(%)				
	非荒漠化	轻度荒漠化	中度荒漠化	重度荒漠化	极重度荒漠化
<1	0.3				
1~2	6.3	2.5			
2~3	13.3	3.7	0.2		
3~4	9.2	4.6	1.1		
4~5	6.3	10.0	2.6		
5~6	5.5	11.2	6.0	0.4	
6~7	3.9	4.3	4.2	1.1	0.4
7~8	3.4	4.0	12.4	1.6	2.2
8~9	4.1	4.3	7.4	0.7	4.2
9~10	4.9	5.2	9.1	0.9	5.0
10~11	6.0	5.1	3.8	8.2	7.4
11~12	3.8	4.4	6.0	31.0	12.5
12~13	3.5	4.3	5.5	12.5	13.5
13~14	3.6	5.2	7.3	13.8	11.8
14~15	3.4	5.6	6.4	7.9	11.0
15~16	4.7	5.6	6.1	3.6	9.3
16~17	4.7	5.4	7.6	4.9	4.7
≥17	5.0	5.8	4.9	5.6	2.6

查和监测,建立了 0~30 cm 深度表层土壤的全盐量与地下水位埋深之间相关关系的表达式(图 5);然后,根据上述 5 级盐渍化土壤含盐量对应的地下水位埋深,构建西北干旱区土壤盐渍化程度与地下水关联度的评价等级指标体系(表 5)。

从图 5 可见,地下水位埋深越浅,表层土壤含盐量越高;反之,水位埋深越大,土壤含盐量越低,其关系式为:

$$y = 9.4014e^{-0.753X} \quad (R^2 = 0.8651)$$

利用上式,求得西北干旱区非盐渍化土壤对应的地下水位埋深大于 4.20 m,盐土级土壤对应的地下水位埋深小于 2.05 m。轻度、中度和强度盐渍化土壤对应的地下水位埋深,分别为 2.73、3.27 m 和 4.20 m。基于上述研究,同时,考虑前人有关西北

干旱区土壤盐渍化与地下水之间关系的研究成果 (Yang Zeyuan et al. , 2006; Fan Zili et al. , 2008; Zhao Rongchang et al. , 2011; Li Ming et al. , 2015), 并按照数据分布范围集中性原则, 同时兼顾土壤岩性因素 (如粉土、粉砂土等), 构建了西北干旱区土壤盐渍化状况与地下水关联度的评价等级划分标准 (表 5)。

3 干旱区地下水生态功能及属性状况评价指标等级划分

西北干旱区地下水生态功能的属性状况评价等级, 来自其要素指标的评价结果。地下水生态功能状况的评价等级, 来自其属性状况的评价结果。地下水生态功能的属性和功能层状况等级的划分及其标准, 如表 6 所示。

表 6 西北干旱区地下水生态功能层、属性层状况的评价等级划分标准
Table 6 Evaluation and classification standard of the state of groundwater ecological function layer and attribute layer in arid area of northwest China

地下水生态功能状况 等级的评价标准	功能指数值	>0.84	0.84~0.67	0.67~0.34	0.34~0.17	<0.17
	状况分级	强	较强	一般	较弱	弱
地下水生态功能的属性状况 等级评价标准	属性指数值	>0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2	<0.2
	状况分级	强	较强	一般	较弱	弱

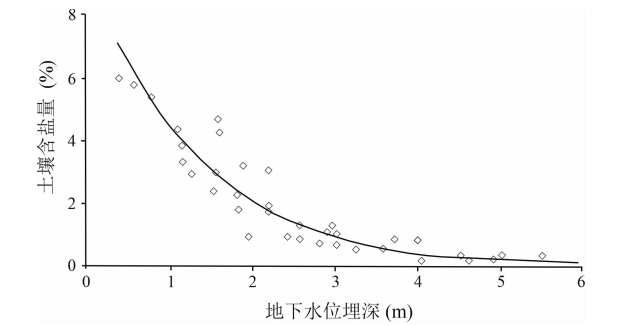


图 5 武威盆地和民勤盆地表层 (0~30 cm 深度) 土壤含盐量与浅层地下水位埋深之间相关关系
Fig. 5 Correlation between soil salinity and groundwater table depth in the surface layer (0~30 cm) of arid area in Wuwei basin and Minqin basin

西北干旱区地下水生态功能的属性和功能层指标状况等级评价, 采用综合评价指数法, 如下式:

$$R = \sum_{i=1}^n a_i X_i$$

式中: R 为地下水生态功能的某一项指标 (记作 Y_i) 的综合评价指数; a_i 为 Y_i 指标在评价中所占权重; X_i 为 Y_i 指标参加评价的参数, 等于 $d_i / d_{\max}$ 或 $d_i / d_{\min}$; n 为评价参数的个数。

地下水生态功能属性层的 3 项指标 (分别为

表 4 西北干旱区土地荒漠化与地下水位埋深之间相关度的评价等级划分标准

Table 4 Evaluation and classification standard of correlation between desertification and groundwater table depth in arid regions of northwest China

地下水位埋深 (m)	0~4	4~6	6~8	8~11	≥11
土地荒漠化程度	非荒漠化	轻度	中度	重度	极重度
与地下水之间关联度	弱	较弱	一般	较强	强

表 5 西北干旱区土壤盐渍化与地下水位埋深之间关联度的评价等级划分标准

Table 5 Evaluation and classification standard of correlation degree between soil salinization and groundwater table depth in arid area of northwest China

土壤含盐量 (%)	>2.0	2.0~1.2	1.2~0.8	0.8~0.4	0.4~0
地下水位埋深 (m)	0~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~5.0	>5.0
与地下水之间关联度	强	较强	一般	较弱	弱

B_i^1 、 B_i^2 和 B_i^3 , 见表 1) 评价参数和权重, 取决于地下水生态功能指标体系中 6 个要素指标的评价结果, 即强、较强、一般、较弱和弱分别对应于赋值 9、7、5、3 和 1, 在每个 250 m×250 m 评价单元都赋有相应的评价数值结果。依据赋值情况, 分别考虑 3 个属性指标评价结果对应的地下水对自然湿地景观维持性、地下水对天然植被绿洲维持性和地下水对农田土地质量维持性, 以及它们所隶属的要素指标 (C_i^1 、 C_i^2 , ..., C_i^6 , 见表 1) 的相对重要性, 然后, 采用层次分析法和序列排序法相结合, 获得全部评价单元评价指标对应的权重, 由此可应用上述综合指数法, 分别计算获得 3 个属性指标的综合评价指数值, 分别记作 $R_{\text{属}}^1$ 、 $R_{\text{属}}^2$ 和 $R_{\text{属}}^3$ 。

地下水生态功能 (功能层) 状况等级的评价参数和权重, 取决于上述 3 个属性的 $R_{\text{属}}^1$ 、 $R_{\text{属}}^2$ 和 $R_{\text{属}}^3$, 评价步骤与属性状况等价评价的步骤相同。

4 应用实例

上述西北干旱区地下水生态功能评价指标体系在石羊河流域进行了示范效验, 应用研究区面积 8170 km², 地处石羊河流域中游的武威盆地和下游的民勤盆地, 该区地下水生态功能评价成果如图 6

所示,经实地核查校验,符合当地地下水生态功能的实际状况。

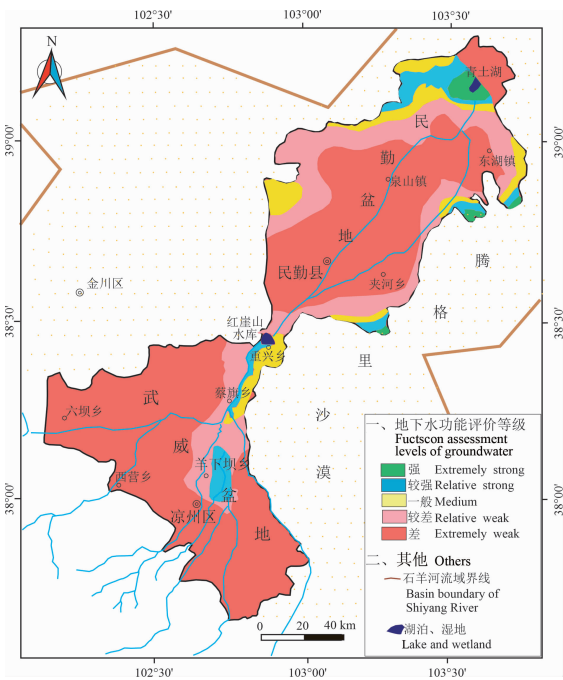


图 6 石羊河流域地下水生态功能评价结果
Fig. 6 Results of ecological function assessment of groundwater in Shiyang River basin

从图 6 可见,石羊河流域平原区地下水生态功能强、较强区,面积 414 km²,占研究区面积的 5.07%,条带状或斑块状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,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,生态系统都会呈现明显的响应变化。

石羊河流域平原区地下水生态功能一般区,面积 578 km²,占研究区面积的 7.07%,条带状分布于武威盆地九墩乡—蔡旗乡—重兴乡的石羊河河道沿线至评价区东部区域,以及民勤盆地北部、东部生态功能强区域的附近。区域的生态系统对地下水(潜水)位埋深状况有一定的依赖性,地下水系统植被环境维持性和土壤质量状况与地下水系统变化之间存在一定的响应关系,地下水的开发利用可能会引起一些因果性生态环境问题。

石羊河流域平原区地下水生态功能较弱区,面积 5447 km²,占研究区面积的 66.67%,条带状分布于武威盆地凉州区-羊下坝乡-下双乡-九墩乡-蔡旗乡的石羊河河道沿线两岸区域,以及民勤盆地靠近

外围环状区域。区域内植被生长状况和土壤盐渍化程度与地下水关联性较弱,地下水系统植被环境维持性和土壤质量状况与地下水系统变化之间存在微弱的响应关系,地下水的开发利用不会引起较明显的因果性生态环境问题。

石羊河流域平原区地下水生态功能弱区,面积 1731 km²,占研究区面积的 21.19%,在评价区占主导地位,占据武威盆地生态功能较弱区外围至研究区边界的全部区域,以及民勤盆地生态功能较弱区环状区域的内部全部区域。区域地下水位埋深大于 15 m,植被生长状况和土壤盐渍化程度与地下水关联性弱,地下水系统植被环境维持性和土壤质量状况与地下水系统变化之间不存在响应关系,地下水的开发利用不会引起因果性生态环境问题。

5 结论

以浅层地下水埋藏状况为核心要素的“西北干旱区地下水生态功能评价指标体系”通过在石羊河流域平原区示范应用,结果表明:

(1)由地下水对自然湿地景观维持性、地下水对天然植被绿洲维持性和地下水对农田土地质量维持性,以及它们隶属的 6 项要素指标构成的地下水生态功能评价指标体系,符合西北干旱区自然湖泊湿地、天然植被绿洲、泉水溢出景观和农田土壤盐渍化对地下水(潜水)水位埋深的强烈依赖状况,它们状况的等级划分机制源自当地客观规律,因此,该套指标体系对于我国西北干旱区地下水功能评价具有参考意义。

(2)由地下水生态功能的要素指标层、属性指标层和功能层组成的西北干旱区地下水生态功能评价指标体系,彼此支撑、互为依托。6 项要素的生态状况,支撑 3 项属性状况的评价等级;与地下水位埋深之间密切相关的 3 项生态属性状况评价等级,支撑评价区地下水生态功能状况的评价等级。

(3)8170 km²的示范应用结果,石羊河流域中、下游平原区地下水生态功能脆弱,生态功能较弱区、弱区面积占主导,分别占工作区总面积的 66.67%和 21.19%;地下水生态功能强、较强区合计面积仅占工作区总面积的 5.07%。由此可见,进一步提高西北干旱区地下水生态功能保护能力刻不容缓。

注 释

① 中国水利水电科学研究院,2000. 西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究. 国家科技攻关项目。

References

Cui Yali, Shao Jingli, Han Shuangpin. 2001. Ecological

- environment adjustment by groundwater in northwest China. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences Beijing), 8(1): 191~196 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zongyu, Nie Zhenlong, Zhang Hesheng, Cheng Xuxue, He Minglin. 2004. Groundwater renewability based on groundwater ages in the Heihe valley alluvial basin, northwestern China. *Acta Geological Sinica*, (8): 560~567 (in Chinese with English abstract).
- Fan Zili, Ma Yingjie, Zhang Hong. 2004. Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River drainage basin. *Arid Land Geography*, 27(1): 8~13 (in Chinese with English abstract).
- Fan Zili, Chen Yaning, Ma Yingjie, Li Heping, Alishir Kurban, Abdumijit. 2008. Determination of suitable ecological groundwater depth in arid areas in Northwest part of China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 22(2): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Jin Xiaomei, Wan Li, Zhang Youkuan, Xue Zhongqi, Yin Ying. 2007. A study of the relationship between vegetation growth and groundwater in the Yinchuan plain. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 197~203 (in Chinese with English abstract).
- Jin Xiaomei. 2010. Quantitative relationship between the desert vegetation and groundwater depth in Ejinaoasis, the Heihe River basin. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 181~186 (in Chinese with English abstract).
- Li Ming, Ning Libo, Lu Tianmei. 2015. Determination and the control of critical groundwater table in soil salinization area. *Journal of Irrigation Drainage*, 34(5): 46~50 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jinpeng, Fei Liangjun, Nan Zhongren, Yin Yakun. 2010. Study on ecological water requirement of the arid oasis based on the theory of ecological security. *Journal of Hydraulic Engineering*, 41(2): 226~232 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhanrong. 2000. Study on the Eco-environmental effect of groundwater development in the inland basins of northwest China. Doctoral dissertation of Chinese Academy of Geological Science (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhanrong, Liu Huatai. 2005. Eco-depth of groundwater table for natural vegetation in inland basin, northwestern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 19(3): 157~161 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jinou, Jin Menggui, Zhou Liling, Zhu Ye. 2017. Influencing factors of solute distribution and change in cotton field in typical cotton-growing ecosystem. *Geological Review*, 63(4): 339~340 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jinting, Hou Guangcai, Yin Lihe, Lu Hua. 2011. Eco-hydrological response of natural vegetation in arid and semi-arid region. *Arid Land Geography*, 34(5): 788~792 (in Chinese with English abstract).
- Qu Yaoguang, Liu Fengjing. 1991. Water resources and their transformation model in Urumqi River basin. *Advances in Water Science*, 2(4): 244~250 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiaoying, Wang Wenke, Jiang Guihua, Zhao Shunyang, Qiao Gang. 2005. Study on ecological function of groundwater in northwest arid inland basin. *Water Resources Protection*, 21(5): 6~10 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunfeng. 2007. Risk assessment of soil salinization in arid inland oasis irrigation area based on GIS—a case study of Yanqi county plant irrigated area. Master thesis of Xinjiang Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Wang Hao, Qin Dayong, Wang Yan, Wang Fang. 2004. Ecological status and its evolution trend in arid region of northwest China. *Journal of Hydraulic Engineering*, (8): 8~14 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinzhe, Zhang Guanghui, Fei Yuhong, Shen Jianmei, Nie Zhenlong, Yan Mingjiang. 2008. Discussing foundation and principle on choosing evaluation index of groundwater function. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (1): 76~81 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenke, Yang Zeyuan, Cheng Donghui, Wang Wenming, Yang Hongbin. 2011. Methods of Ecology-Oriented groundwater resource assessment in arid and semi-arid area. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(1): 159~167 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenke, Gong Chengcheng, Zhang Zaiyong, Chen Li. 2018. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions. 2008. *Advances in Earth Science*, 33(7): 702~718 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zeyuan, Wang Wenke, Wang Yanlin, Duan Lei. 2006a. Research on supergene Eco-effect induced by groundwater in arid and semi-arid regions and its assessment index system. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(3): 107~111 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zeyuan, Wang Wenke, Huang Jinting, Duan Lei. 2006b. Research on buried depth of Eco-safety about groundwater table in the blownsand region of the northern Shanxi Province. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 34(8): 67~74 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zeyuan, Wang Wenke. 2009. Reviews and prospects on eco-effect induced by groundwater in arid and semi-arid regions. *Arid Land Geography*, 32(5): 739~745 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huichang. 1992. Balanced buried depth of groundwater table in arid regions. *Site investigation science and technology*, (6): 9~13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changchun, Shao Jingli, Li Cijun, Cui Yali. 2003. Eco-environmental effects on groundwater and its eco-environmental index. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 30(3): 6~10 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fawang, Chen Li, Yu Qiusheng, Xue Zhongqi. 2006. Research on the forming mechanism of the groundwater quality in the southern Ningxia autonomous region. *Geological Review*, 52(6): 810~814 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guanghui, Hao Mingliang, Yan Mingjiang, Nie Zhenlong. 2006a. Origin and achievement of groundwater evolution research on continental scale in China. *Geological Review*, 2(6): 771~776 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guanghui, Nie Zhenlong, Shen Jianmei, Wang Jinzhe, Yan Mingjiang, Hao Mingliang, Yang Lizhi, Liu Zhongpei, Lian Yingli, Zhang Xingnan. 2009. Study on theory and method of sustainable evaluation of regional groundwater function. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhang Guanghui, Shen Jianmei, Nie Zhenlong, Wang Jinzhe, Yan Mingjiang, Hao Mingliang. 2006b. Theory and methodology of regional groundwater function and sustainable utilization assessment in China. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 4: 62~66 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Rongchang, Ba Jianwen, Qin Xiaoyan, Ma Xiaoquan, Liu Zhenhua, Tian Liaoxi. 2011. Determine the critical depth of groundwater in the city wetlands of Zhangye. *Groundwater*, 33(1): 34~35 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 崔亚莉, 邵景力, 韩双平. 2001. 西北地区地下水的地质生态环境调节作用研究. *地质前缘*, 8(1): 191~196.
- 陈宗宇, 聂振龙, 张荷生, 程旭学, 郝明林. 2004. 从黑河流域地下水年来论其资源属性. *地质学报*, (8): 560~567.
- 范锡朋. 1962. 论干旱地区山前平原地下水形成的水文因素. *地质学报*, 42(1): 15~24.
- 樊自立, 马英杰, 张宏. 2004. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定. *干旱区地理*, 27(1): 8~13.
- 樊自立, 陈亚宁, 李和平, 马英杰, 艾里西尔·库尔班, 阿布都米吉提. 2008. 中国西北干旱区生态地下水位埋深适宜深度的确定. *干旱区资源与环境*, 22(2): 1~5.
- 金晓媚, 万力, 张幼莲, 薛忠岐, 殷瑛. 2007. 银川平原植被生长与地下水关系研究. *地质前缘*, 14(3): 197~203.
- 金晓媚. 2010. 黑河下游额济纳旗绿洲荒漠植被与地下水位埋深的

定量关系. 地学前缘, 17(6): 181~186.

李明, 宁立波, 卢天梅. 2015. 土壤盐渍化地区地下水临界深度确定及其水位调控. 灌溉排水学报, 34(5): 46~50.

刘金鹏, 费良军, 南忠仁, 尹亚坤. 2010. 基于生态安全的干旱区绿洲生态需水研究. 水利学报, 41(2): 226~232.

郭占荣. 2000. 西北内陆盆地地下水的生态环境效应研究. 中国地质科学院博士学位论文.

郭占荣, 刘华台. 2005. 西北内陆盆地天然植被的地下水生态埋深. 干旱区资源与环境, 19(3): 157~161.

黄金瓯, 靳孟贵, 周丽玲, 诸烨. 2017. 典型植棉生态系统内棉田溶质分布与变化的影响因素. 地质论评, 63(4): 339~340.

黄金廷, 候光才, 尹立河, 卢桦. 2011. 干旱半干旱区天然植被的地下水水文生态响应研究. 干旱区地理, 34(5): 788~792.

曲耀光, 刘风景. 1991. 乌鲁木齐河流域的水资源及其转化模型. 水科学进展, 2(4): 244~250.

乔晓英, 王文科, 姜桂花, 赵顺阳, 乔冈. 2005. 西北干旱内陆盆地地下水生态功能的探讨. 水资源保护, 21(5): 6~10.

王春峰. 2007. 基于 GIS 干旱内陆河绿洲灌区土壤盐渍化危险度评价-以焉耆县平原灌区为例. 新疆农业大学硕士学位论文.

王浩, 秦大庸, 王研, 王芳. 2004. 西北内陆干旱区生态环境及其演变趋势. 水利学报, 8: 8~14.

王金哲, 张光辉, 申建梅, 聂振龙, 严明疆. 2008. 地下水功能评价指标选取依据与原则的讨论. 水文地质工程地质, 2: 76~81.

王文科, 杨泽元, 程东会, 王文明, 杨红斌. 2011. 面向生态的干旱半干旱地区区域地下水资源评价的方法体系. 吉林大学学报(地球科学报), 41(1): 159~167.

王文科, 宫程程, 张在勇, 陈立. 2018. 旱区地下水文与生态效应研

究现状与展望. 地球科学进展, 33(7): 702~718.

杨泽元, 王文科, 王雁林, 段磊. 2006a. 干旱半干旱区地下水引起的表生生态效应及其评价指标体系研究. 干旱区资源与环境, 20(3): 107~111.

杨泽元, 王文科, 黄金廷, 段磊. 2006b. 陕北风沙滩地区生态安全地下水水位埋深研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 34(8): 67~74.

杨泽元, 王文科. 2009. 干旱半干旱区地下水引起的生态效应的研究现状与发展趋势. 干旱区地理, 32(5): 739~745.

张惠昌. 1992. 干旱区地下水生态平衡埋深. 勘察科学技术, 6: 9~13.

张长春, 邵景力, 李慈君, 崔亚莉. 2003. 地下水位生态环境效应及生态环境指标. 水文地质工程地质, 30(3): 6~10.

赵慧琴. 2003. 浅谈地下水与土地沙化的关系. 新疆地质, 21(4): 506.

张发旺, 陈立, 余秋生, 薛忠岐. 2006. 宁夏南部地区水质形成机制研究. 地质论评, 52(6): 810~814.

张光辉, 郝明亮, 杨丽芝, 聂振龙. 2006a. 中国大尺度区域地下水演化研究起源与进展. 地质论评, 52(6): 771~776.

张光辉, 聂振龙, 申建梅, 王金哲, 严明疆, 郝明亮, 杨丽芝, 刘中培, 连英立, 张行南. 2009. 区域地下水功能可持续评价理论与方法研究. 北京: 地质出版社.

张光辉, 申建梅, 聂振龙, 王金哲, 严明疆, 郝明亮. 2006b. 区域地下水功能及可持续利用性评价理论与方法. 水文地质工程地质, 4: 62~66.

赵荣昌, 巴建文, 秦晓燕, 马小泉, 马振华, 田辽西. 2011. 防止张掖城市湿地周边地区土壤盐渍化的地下水临界深度确定. 地下水, 33(1): 34~35.

Construction and application of evaluation index system of groundwater ecological function in northwest arid area

WANG Jinzhe^{1,2)}, ZHANG Guanghui^{*1)}, WANG Qian¹⁾, CUI Haohao¹⁾, LIU Pengfei¹⁾

1) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;
2) Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061, China
* Corresponding author: Huanjing59@163.com

Abstract

The natural conditions in the arid area of northwest China are very bad, precipitation is low, evaporation is intense, and water resources are scarce. In the meantime, natural lakes and wetlands, natural vegetation oases and soil salinization are strongly dependent on the ecological water level of groundwater. Therefore, it is an important challenge to construct the evaluation index system of groundwater ecological function in northwest arid area. Based on the study of the relationship between different types of ecological conditions and groundwater table depth in arid area, the evaluation index system of groundwater ecological function in arid area of northwest is constructed using the shallow groundwater as the core factor. It is composed of 3 attribute indexes that include the maintenance of natural wetland landscape by groundwater, the maintenance of natural vegetation oases, and the maintenance of farmland land quality. The application results in the middle and lower reaches of the Shiyang River basin show that the index system may offer reference for the evaluation of groundwater function in the arid and semi-arid areas of northwest China, and it also indicates that the ecological function of groundwater in the middle and lower reaches of the Shiyang River Basin is fragile. The weak ecological function accounts for 87.86% of the total area of the demonstration application area, while the strong and strong ecological function of groundwater accounts for only 5.07%. Therefore, it is urgent to improve the ability of groundwater ecological function protection in arid area of northwest China.

Key words: the arid area; groundwater; ecological function; index system; natural wetland; desertification