毛乌素沙漠萨拉乌苏组地下水特征与植被分布关系

范 磊[1,2]，侯光才[3]，陶正平[3]

(1. 长安大学环境科学与工程学院，西安 710054；
2. 西安市城市规划设计研究院，西安 710082；3. 中国地质调查局西安地质调查中心，西安 710054)

摘要：利用钻探和抽水试验资料，结合遥感资料和植被实地样方调查资料，分析了该区地下水富集特征和开发利用对生态环境的影响。结果表明：含水层的厚度是地下水富集的主控因素，二者呈正相关关系；基底古凹陷分布区含水层厚度较大，是地下水的富集区；埋深 3 m 是滩地地下水开采的约束水位，过量的开采可能造成湖盆滩地植被向沙地植被的演替或退化，甚至消亡，加快沙漠化进程；地下水开采对沙地、沙丘生长的耐干旱植被物种的影响较小。研究结果可为该区内水源地选址、地下水合理开发利用、水土保持和生态环境保护提供基础理论和数据。

关键词：地下水；富集特征；开发利用；生态环境；毛乌素沙漠

中图分类号：P967 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2018)04-0151-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.024

Characteristics of Groundwater and Its Relation with Vegetation Distribution in Sara Wusu Formation of Mu Us Desert

FAN Lei[1,2], HOU Guangcai[3], TAO Zhengping[3]

(1. *School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an* 710054; 2. *Xi'an Urban Planning and Design Institute, Xi'an* 710082; 3. *Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, Xi'an* 710054)

Abstract: The characteristics of groundwater in Sara Wusu Formation and its effects on the eco-environment were studied by using the data of drilling and pumping test, and remote sensing data and vegetation survey. The results showed that the aquifer thickness was the main controlling factor of the groundwater accumulation, and there was a positive correlation between the two above; in the distribution area of the basement depression, aquifer thickness was greater, which was the enrichment area of the groundwater; the buried depth of 3 m was the constrained water level for groundwater exploitation in the beach area. Excessive exploitation of groundwater might cause the succession or degradation of the vegetation on the beach to the sandy land, or even disappear, and speeding up the desertification process. Groundwater mining had no significant effect on the growth of drought-tolerant vegetation species on sandy and dune lands. These research results provided the basic theory and data for the site selection, rational exploitation and utilization of the groundwater, water and soil conservation and ecological environment protection and in the desert.

Keywords: groundwater; enrichment characteristics; exploitation and utilization; ecological environment; Mu Us Desert

萨拉乌苏组含水层是一个地跨蒙、陕两省接壤部位的区域含水层，其中陕西省分布面积 7 868 km^2，内蒙古分布面积 14 600 km^2。萨拉乌苏组地下水具有埋藏较浅、补给条件好、富水性强和水质普遍较好的特点，对陕北能源基地和内蒙古鄂尔多斯能源基地供水意义重大。相关研究[1-4]多集中在陕西境内，揭示了煤炭开采对陕北萨拉乌苏组含水层水文地质特征与富水性的影响机制，并建立了基于生态约束的萨拉乌苏组地下水优化管理模型。但对内蒙古境内的萨拉乌苏组含水层的研究除在相关技术报告上零星出现过外，尚未见公开报道。相关研究虽然也曾提出含水层厚度和基底古凹陷对地下水富集性产生影响，但

收稿日期：2018-03-23
资助项目：国土资源大调查项目“鄂尔多斯盆地内蒙古能源基地地下水勘查”(1212010734002)
第一作者：范磊(1985—)，男，博士研究生，工程师，主要从事水资源与环境研究。E-mail：784555040@qq.com
通信作者：侯光才(1958—)，男，博士，研究员，主要从事旱区盆地水文地质勘察研究。E-mail：xahgc@163.com

缺少详细的勘探资料支撑，尚欠深入。萨拉乌苏组地下水是维系当地生态环境平衡的最主要因素，随着当地煤炭资源开发规模不断扩大和煤化工产业的快速发展，需水量逐年攀升。因此，科学处理地下水开发利用和沙漠生境保护的关系，受到广泛关注。国内外学者对地下水与天然植被、地表荒漠化等方面关系的研究近年来有较大进展[5]，尤其在干旱半干旱地区地下水位埋深对植被生态影响研究方面许多学者结合不同地区进行了有益的探讨[6-9]；借助遥感数据研究区域地下水埋深对植被覆盖度影响规律的新技术发展较快[10-11]。已有学者[12-14]结合内蒙能源基地地下水开发对植被生态的影响进行研究，并取得了可喜成果。但由于内蒙能源基地地形地貌、水文地质和植被生态多样，研究成果多揭示的是大区域的一般规律，而对内蒙毛乌素沙漠萨拉乌苏组地下水开发与生态环境保护方面的专门研究还有待深入。本文依托“鄂尔多斯盆地内蒙能源基地地下水勘查”实测资料，重点分析萨拉乌苏组地下水的富集特征、地下水与植被分布关系及地下水开发的生态环境保护问题。

1 研究区概况

鄂尔多斯盆地是中生代形成的大型内陆拗陷盆地。研究区位于鄂尔多斯盆地的中东部，更新世以来，该地区处于相对的局部沉降区。萨拉乌苏含水层形成演化主要受古沉积环境和古气候控制[15]。研究区在中生代早白垩世之后，受燕山Ⅲ幕运动的影响，地块整体抬升，进入全面剥蚀期，早白垩世沉积在长期强烈剥蚀作用下，变得表面起伏不平。在区域地块整体抬升过程中，毛乌素沙漠则表现为局部相对缓慢沉降的特征，再加上长期强烈剥蚀作用，形成低平洼地。晚更新世早期该区气候温暖潮湿，流水作用强烈，低平洼地发育众多河流和湖泊，形成古萨拉乌苏湖区，沉积了以中砂细砂为主，间或夹有砂质亚黏土具河湖相特征的萨拉乌苏组[16]。

萨拉乌苏组地下水主要分布于内蒙乌审旗及鄂托克前旗、伊金霍洛旗东部毛乌素沙漠地区，总体以北东—南西向呈条带状展布，面积约 14 600 km^2（图 1）。地表多被风积沙覆盖，地形相对较为平缓，相对高差 5～10 m。地貌类型以风积沙地、沙丘为主，湖盆滩地呈斑块状分布。区内降水稀少，蒸发强烈，生态环境脆弱。

据“鄂尔多斯盆地内蒙能源基地地下水勘查”项目资料，萨拉乌苏组地下水天然补给量为 322×10^4 m^3/d，可开采量为 207×10^4 m^3/d，地下水现状开采量为 29×10^4 m^3/d（2011 年），尚有 178×10^4 m^3/d 的可开采资源，具有很大的开发潜力，是研究区有重要供水意义的含水层。在 4 个地下水富集区可采资源量为 68.00×10^4 m^3/d，占总可采资源量的 33%。

哈图才当水源地地处毛乌素沙漠的东北部（38°43′44″—39°08′00″N，109°02′50″—109°41′00″E）。区内地形相对较为平缓，主要的地貌特征为湖盆滩地和固定、半固定及流动半流动沙丘、沙地，大部分地区为风积沙所覆盖，湖盆滩地呈斑块状分布。生态现状主要为天然草场和固定半固定沙丘、沙地上生长的沙生植物以及湖盆滩地的喜水植物和乔灌木植物。

萨拉乌苏组为区内主要含水层，水力性质为潜水，含水层厚度受古地形控制。地下水埋深随地形变化，在滩地及其周围地下水埋深较小。

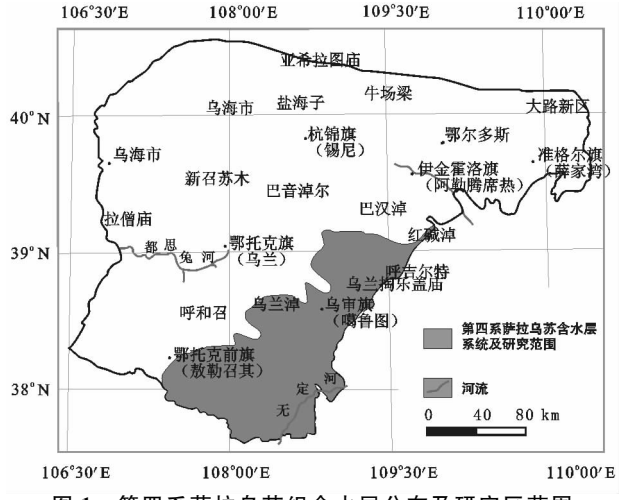

图 1 第四系萨拉乌苏组含水层分布及研究区范围

2 研究资料与方法

2.1 研究资料

“鄂尔多斯盆地内蒙能源基地地下水勘查”项目资料有：乌审旗陶利水源地基底古凹陷南北方向两条勘探线 7 个钻孔岩性和厚度资料（2009 年）；乌审旗陶利及乌兰陶勒盖水源地 14 个钻孔稳定流抽水试验资料（2010 年）；遥感资料通过获取美国陆地资源卫星（ETM）（2007 年 8 月）遥感影像数据，遥感影像数据制作成遥感影像图，选用 MODIS 数据的植被指数产品（NDVI）；哈图才当水源地地区 12 个植被样方实地调查资料（2010 年）。12 个植被生态大样方分布在滩地、沙地、沙丘等典型地貌或不同地貌单元过渡部位，大小 100 m×100 m；在大样方中心和 4 个边角布设小样方 5 个（10 m×10 m）；样方调查主要内容有潜水位、植被类型及盖度等。

2.2 研究方法

在收集“鄂尔多斯盆地内蒙能源基地地下水勘查”项目 7 个水文地质钻孔资料（2009 年）基础上，采用作图分析法，详细分析并揭示该区含水层岩性与厚度的空间变化特征；再利用不同地区 14 个钻孔稳定

流抽水试验资料(2010 年),通过统计和图表分析,揭示该区地下水富集特征。接着选取区内哈图才当水源地作为典型研究区,通过区域遥感资料(2007 年 8 月)的解译,用 ArcGIS 软件输入 NDVI 数据计算,运用 Excel 进行数据整理生成的散点图从宏观上定性分析沙地、滩地区潜水埋深与 NDVI 的关系;NDVI 是归一化植被指数,能够直接反映植被盖度高低,可以通过遥感方法直接获取。在分析时,采用 ArcGIS 软件,将区域潜水位埋深设定在 10 m 范围,并将其按步长 0.1 m 重新分类。导入 NDVI 数据,统计各步长区间范围内植被指数的平均值,近似作为每一个区间埋深对应的 NDVI 值,将运算结果输出,在 Excel 里完成数据的后期运算整理,绘制 NDVI 与埋深中心(埋深中心:每一个埋深区间的平均数)散点图。运用散点图从宏观上定性分析沙地、滩地区潜水埋深与 NDVI 的关系。然后依据 12 个植被样方实地调查资料(2010 年),通过统计计算、散点图、典型剖面、植被盖度分区等分析方法,从微观上定量研究地下水位埋深与植被生态的关系,相互验证研究结果的可信性。最后在地下水位埋深与植被生态关系研究的基础上探讨地下水开发利用的区域生境保护问题。

3　结果与分析

3.1　萨拉乌苏组含水层特征及其对地下水富集的影响

3.1.1　*含水层特征*　分析钻孔资料得出,含水层岩性主要为粗砂、中砂、细砂和粉砂,中间夹砂质亚黏土透镜体薄层。细砂层厚度大,延展范围广;中粗砂与砂质黏土多呈夹层出现(图 2)。砂质黏土层在研究区东北和西南局部区域分布较厚。

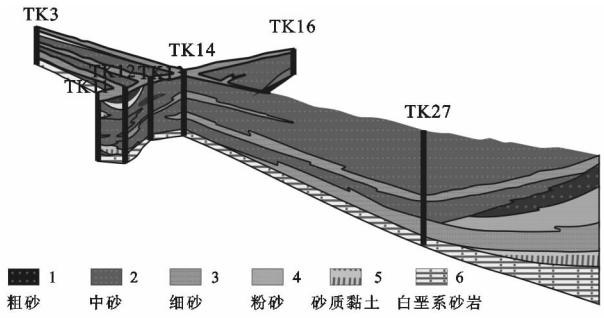

图 2　萨拉乌苏组含水层结构剖面

从图 2 可以看出,钻孔 TK12 揭示的含水层粗砂层厚度较大(渗透系数 $K=5.75$ m/d),而 TK14 揭示的含水层粉细砂层厚度较大($K=4.45$ m/d),两孔揭示的含水层厚度仅相差 0.67 m,但抽水试验得出的换算涌水量 TK12 比 TK14 大 1 113.11 m^3/d,主要是含水层岩性影响的结果。通过分析萨拉乌苏组不同地段岩性(表 1)得出,粗中砂颗粒的百分比越大,富水性越好;细砂和砂质黏土颗粒占含水层百分比越大,富水性越差。含水层岩性特征对地下水富集有一定影响,但不是主导因素。

萨拉乌苏组含水层厚度受基底白垩系古地形控制,在白垩系基底剥蚀强烈的古凹陷区厚度较大,向古凹陷周边逐渐变薄。研究区相间分布有 4 个呈北东—南西向展布的白垩系基底古凹陷(图 3),分别分布在萨汗毛里、海流图庙、陶利、珠和苏木地区,在这 4 个古凹陷区,含水层的厚度相对较大,多在 60～100 m。古凹陷分布区也是地下水的主要富集区。

表 1　萨拉乌苏组地下水不同富水区含水介质颗粒成分

单位:%

富水区	粗砂	中砂	细砂	砂质黏土
强富水区	3.45	33.52	51.51	11.52
较强富水区	7.76	31.85	55.46	4.93
中等富水区	0.00	20.19	62.55	17.26

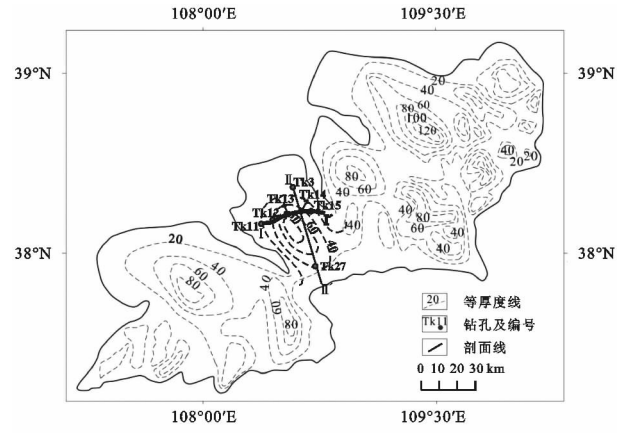

图 3　萨拉乌苏组含水层厚度等值线

选取区内陶利水源地东西和南北两条勘探线钻孔资料(图 3),详细分析古凹陷内含水层厚度的变化规律。东西向勘探线(Ⅰ－Ⅰ′)共布设 5 个钻孔,分别为 TK11、TK12、TK13、TK14 和 TK15,各钻孔揭露的含水层厚度依次为 48.75,59.89,80.00,48.75,50.00 m,位于古凹陷中心位置的 TK13 揭露含水层厚度最大,向东西两侧周边依次变薄。南北向勘探线(Ⅱ－Ⅱ′)共包括 3 个钻孔 TK3、TK14 和 TK27,其中 TK14 相对位于古凹陷中心,揭露的含水层厚度为 48.75 m,TK27 和 TK3 分别位于古凹陷南北周边,揭露的含水层厚度分别为 40.00,33.44 m,可以看出在南北方向含水层厚度也表现为从中心向周边变薄的规律。

3.1.2　*含水层特征对地下水富集的影响*　选取区内乌兰陶勒盖和陶利地区不同富水区抽水试验资料,进行统计分析(表 2～表 4),得到各含水层的基本参数。

渗透系数(K)是表示含水层渗透性能和岩性特征的一个重要指标,从表 2～表 4 含水层基本参数来看,渗透系数(K)和涌水量之间存在一定关系,如表

3 中 WL18 和 WL9 抽水孔，虽然 WL18 孔含水层厚度比 WL9 大 17 m，但由于渗透系数(K)较 WL9 小得多，所以涌水量也比 WL9 小得多，这进一步说明岩性特征对地下水富集有一定影响。但从总体分析，含水层岩性特征不是地下水富水性的主导因素，含水层的富水性主要取决于含水层厚度及其空间变化。

表 2 强富水区抽水试验含水层基本参数

孔号	位置	含水层厚度/m	水位埋深/m	降深/m	涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	单位涌水量/($m^3 \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$)	换算涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	渗透系数(K)/($m \cdot d^{-1}$)	矿化度/($g \cdot L^{-1}$)
WL6	乌审旗乌兰陶尔木庙	35.97	1.57	14.63	1720.22	117.58	1763.73	5.10	0.39
WL14	乌审旗乌兰陶勒盖	141.20	1.83	5.94	1229.47	206.98	3104.73	1.68	0.42
WL11	乌审旗乌兰陶勒盖	60.20	1.40	5.53	1767.74	319.66	4794.97	6.39	0.27
WL12	乌审旗乌兰陶勒盖	67.55	2.00	5.54	1427.33	257.64	3864.61	4.49	0.26
TK12	陶利呼和芒	59.89	1.58	9.25	2408.83	260.41	3906.21	5.75	0.41
TK14	陶利二大队	58.08	0.92	12.18	2268.00	186.21	2793.10	4.45	0.25
TK18	陶利呼和芒	63.83	0.87	13.04	2706.91	207.59	3113.78	4.57	0.30
	平均	69.53	1.45	9.44	1932.64	204.64	3334.45	3.80	0.33

表 3 较强富水区抽水试验含水层基本参数

孔号	位置	含水层厚度/m	水位埋深/m	降深/m	涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	单位涌水量/($m^3 \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$)	换算涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	渗透系数(K)/($m \cdot d^{-1}$)	矿化度/($g \cdot L^{-1}$)
WL14	乌审旗乌兰陶勒盖	124.60	1.83	5.49	1229.47	223.95	2239.48	2.05	0.311
WL10	乌兰陶勒盖巴音高勒	32.60	0.92	11.49	2352.67	204.76	2047.58	9.51	0.300
WL9	乌审旗乌兰陶勒盖	40.94	0.91	11.78	1537.92	130.55	1305.53	4.51	0.376
WL18	乌审旗乌兰陶勒盖	57.93	0.67	15.32	1229.47	80.25	802.53	1.93	0.210
WL17	乌审旗乌兰陶勒盖	32.48	1.22	18.80	1229.47	65.40	653.97	3.53	0.462
WL8	乌审旗乌兰陶勒盖	21.22	1.68	14.30	1229.47	85.98	859.77	7.51	0.408
TK5	乌审旗伊连陶勒盖	36.02	1.18	16.48	1195.78	72.56	725.59	3.20	1.907
TK6	乌审旗陶尔木庙	35.97	1.57	14.63	1720.22	117.58	1175.82	5.10	0.384
TK7	乌审旗陶尔木庙	30.87	1.23	11.95	1889.57	158.12	1581.23	7.84	0.443
TK8	乌审旗陶尔木庙	41.51	0.99	15.06	1627.78	108.09	1080.86	3.94	0.320
TK9	乌审旗陶利	46.28	3.22	16.43	1651.97	100.55	1005.46	3.30	—
TK11	陶利呼和芒哈	48.75	1.42	10.89	1914.62	175.81	1758.15	4.95	0.466
TK21	乌审旗陶利	36.13	0.87	16.35	2241.22	137.08	1370.77	6.27	—
TK31	乌审旗陶利	25.80	1.20	9.77	2241.22	229.40	2293.98	13.50	0.252
	平均	43.65	1.35	13.48	1663.63	135.01	1350.05	4.11	0.487

表 4 中等富水区抽水试验含水层基本参数

孔号	位置	含水层厚度/m	水位埋深/m	降深/m	涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	单位涌水量/($m^3 \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$)	换算涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	渗透系数(K)/($m \cdot d^{-1}$)	矿化度/($g \cdot L^{-1}$)
TK2	乌审旗陶尔木庙四大队	17.82	2.13	8.82	312.77	35.46	354.61	2.80	0.70
TK3	乌审旗陶尔木庙三大队	33.44	1.76	15.18	984.96	64.89	648.85	3.02	0.33
TK4	乌审旗陶尔木庙三小队	28.65	3.00	19.80	887.07	44.80	448.01	2.94	0.37
ZK205	乌审旗河南尔林川	143.75	9.44	3.84	371.52	96.75	967.50	0.67	0.17
	平均	26.64	4.08	11.91	639.08	60.47	604.75	2.80	0.39

由图 4 可以看出，含水层厚度在 18～70 m 区间内，总体趋势表现为涌水量随厚度增大而增大，呈现线性相关关系。含水层厚度是萨拉乌苏组地下水富集性的主控因素，含水层厚度较大，富水性相对较好，单井出水量较大；含水层厚度较小，富水性较差，单井出水量较小。

对比发现 4 个地下水富集区，沿北东—南西方向依次为乌审召苏木—乌兰陶勒盖、海流图庙、陶利—沙尔利哥苏木、阿日勒庙—河南地下水富集区(图 5)与萨汗毛里、海流图庙、陶利、珠和苏木 4 个古凹陷分布区(图 3)基本吻合，这说明在基底古凹陷分布区河湖相沉积物厚度大，含水层厚度较大，为地下水提供了较好的赋存空间，有利于地下水富集。所以基底古凹陷分布区也是地下水的富集区，这是萨拉乌苏组地下水富集的突出特征。地下水水源地主要分布在地下水的富集区(图 5)。图 5 和图 3 对比还发现，两个强富水区均处于基底古凹陷分布区中心含水层厚度最大的部位，从凹陷中心向周边随含水层厚度逐渐变

薄,地下水富水性表现为强富水区→较强富水区→中等富水区的变化规律。

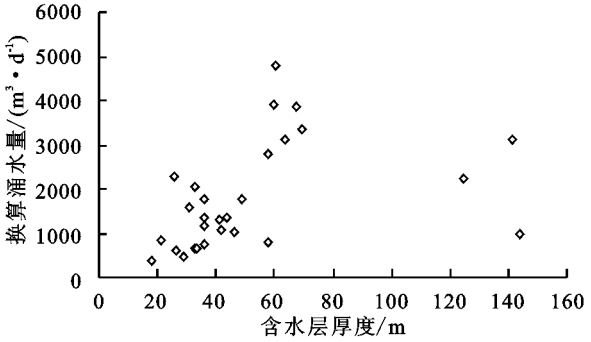

图 4　萨拉乌苏组含水层厚度与单井出水量关系

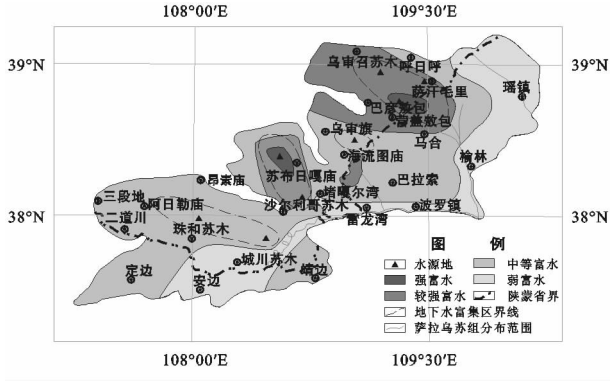

图 5　萨拉乌苏组地下水富集区及规划水源地分布

3.2　地下水与植被生态的关系

3.2.1　植被盖度与植被类型的分布特征　选取以萨拉乌苏含水层为供水目标含水层的哈图才当水源地为地下水与植被生态关系研究的典型地区,通过综合不同地貌单元 12 个实地植被样方的植被类型及其盖度调查结果,绘制成哈图才当水源地植被盖度分区图(图 6)和不同地貌单元植被生态剖面图(图 7)。

从图 6 和图 7 可以看出,在不同地貌单元植被类型及其盖度的分布特征为:Ⅰ植被覆盖密集区,植被覆盖度大于 60%,主要分布在丘间洼地和湖盆滩地区;主要植被类型为乔木类、灌木类、沙生植物和喜水植物等。其中滩地地区生长的主要植被类型有苔草、芨芨草和沙柳等,以苔草等草本植物为主,植被覆盖度最大。Ⅱ植被分布较密集区,植被覆盖度为 40%～60%,主要分布在滩地向沙丘过渡地带;主要植被类型为乔木类、灌木类,以沙柳、沙蒿为主,芨芨草和寸草次之。Ⅲ植被分布较稀疏区,植被覆盖度为 20%～40%,主要分布在固定半固定沙丘或流动半流动沙丘,植被类型以沙蒿、沙柳为主,也有乔木类和其他灌木类植物生长。Ⅳ植被分布稀疏区:植被覆盖度小于 20%,主要分布在流动半流动沙丘上,植被类型有沙蒿、沙柳和沙米等沙生植物。

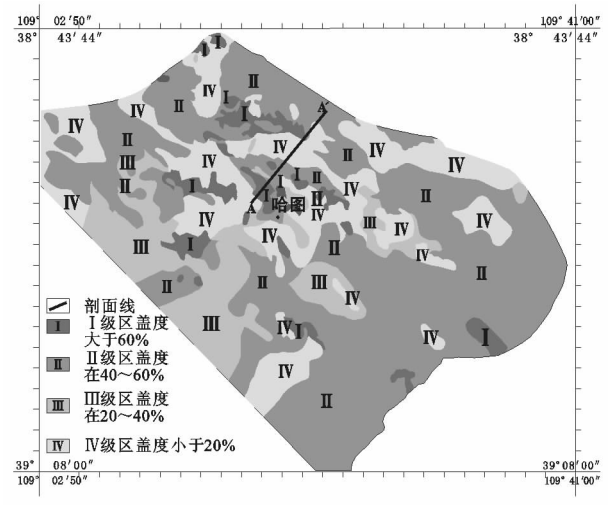

图 6　哈图才当水源地植被盖度分区

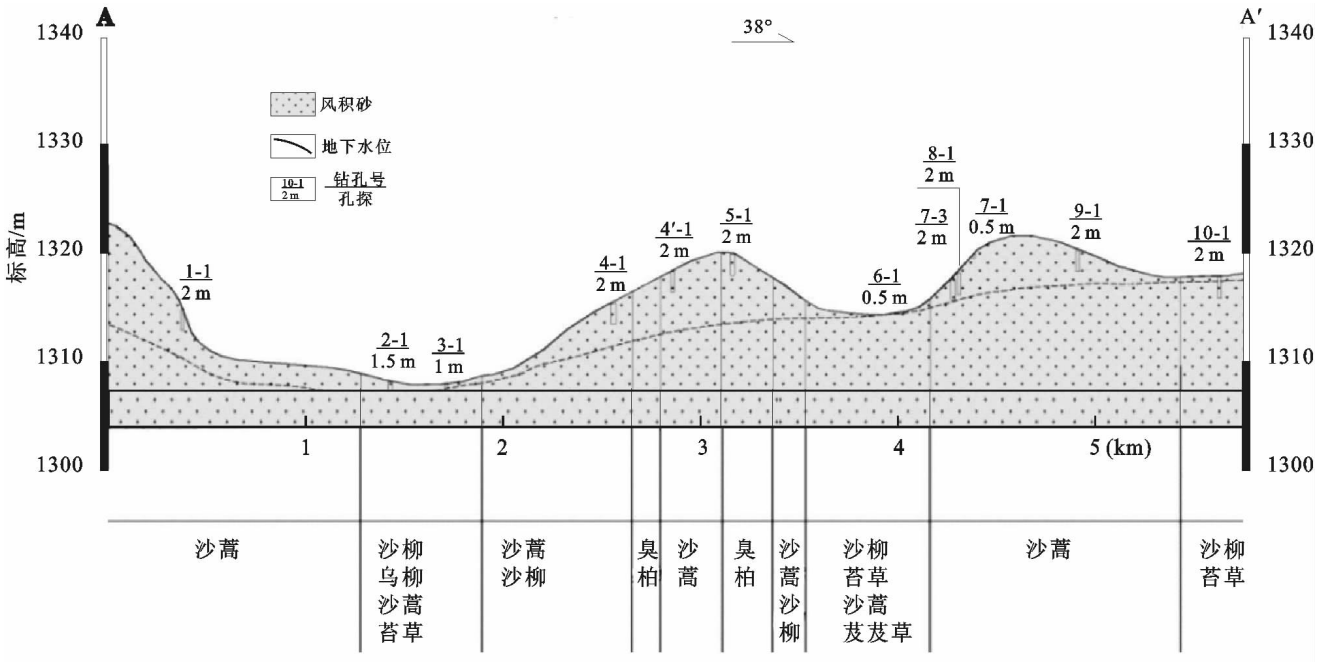

图 7　哈图才当水源地不同地貌单元植被生态剖面

3.2.2 不同地貌单元植被生态与地下水埋深的关系

(1)基于区域遥感解译分析的沙地、滩地区潜水埋深与 NDVI。图 8 中散点较为分散,显示沙地地区潜水位埋深对 NDVI 均值影响较小,这说明在沙地地区潜水位埋深对植被盖度影响不显著。

从图 9 可以看出,滩地地区 NDVI 均值对潜水位埋深反应敏感。在 0～3 m 范围,随着潜水位埋深增大,NDVI 均值呈现下降趋势;潜水位埋深超过 3 m 时,NDVI均值发生转折性变化;潜水位埋深 3～5 m 范围,NDVI 均值呈现增大趋势。这一现象反映出滩地植被向沙地植被过渡;当潜水位埋深大于 5 m 时,已对 NDVI 均值影响甚微。通过以上分析可以得出潜水位埋深 3 m 左右是滩地地区植被生态的敏感水位。

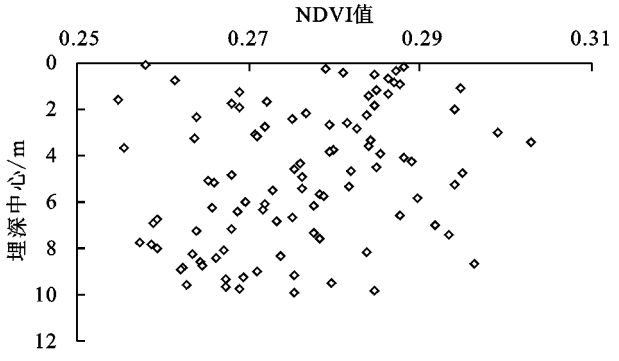

图 8 沙地地区 NDVI 与潜水位埋深

(2)代表性植被物种与潜水位埋深关系。代表性植被物种是指不同地貌单元现状下盖度最大的物种。根据实地植被调查,苔草为滩地区植被代表性物种;沙柳为平缓沙地地区植被代表性物种;沙蒿为沙丘地区代表性植被物种(图 10)。

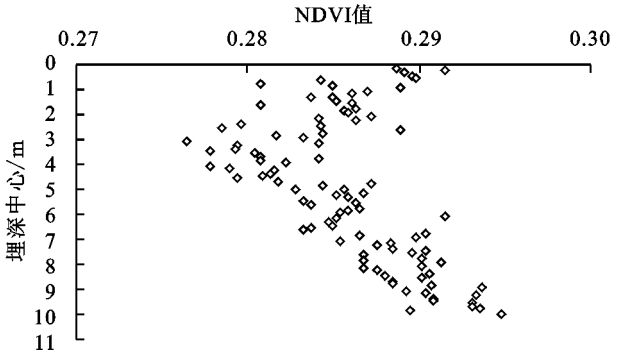

图 9 滩地地区 NDVI 与潜水位埋深

①滩地地区:滩地地区植被代表性物种苔草在潜水位埋深 3 m 范围内,其盖度在 60%以上,当潜水位埋深>3 m 时,盖度发生突变,总体<5%。说明滩地地区苔草等草本植物与潜水位埋深关系密切,植被对潜水位埋深具有较强的依赖性,滩地地区地下水植被生态效应为敏感型,敏感水位埋深为 3 m。

②平缓沙地地区:沙柳盖度在潜水位埋深 1 m 左右出现最大值,1～2 m 范围盖度较大,潜水位埋深超过 2 m 沙柳盖度骤减,但在 5 m 范围,相同的潜水位埋深其盖度有高有低。说明分布在平缓沙地的沙柳等灌木半灌木物种的生长状况和潜水位埋深有一定关系,当潜水位埋深适宜时,生长茂盛,盖度也大;但沙柳在潜水位埋深较大的沙丘顶部也能生长,说明其与潜水位埋深的关系不密切。分析认为在滩地向高大沙丘过渡的平缓沙地地区(潜水位埋深 3～5 m)地下水植被生态效应表现为不显著敏感型。

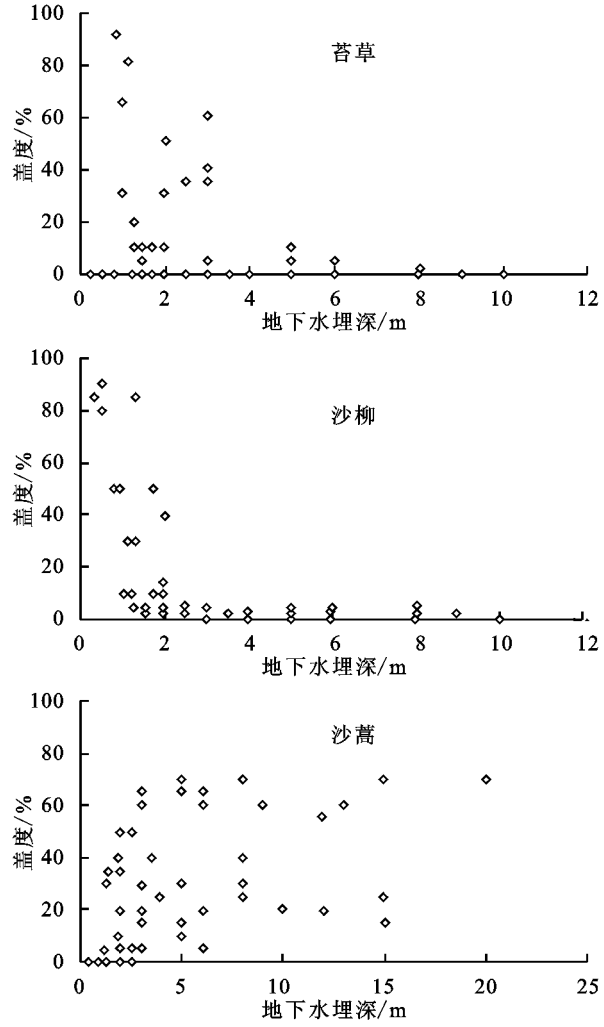

图 10 不同地貌单元代表性植被物种与潜水位埋深关系

③沙丘地区:沙蒿盖度与潜水位关系散点较为分散,几乎在各潜水位埋深条件下都有沙蒿出现。沙蒿盖度与潜水位埋深关系基本不相关。说明以沙蒿为代表的耐干旱植被物种,生长基本不依赖地下水,盖度也与潜水位埋深无关,在潜水位埋深较大的情况下也能保持较大盖度。分析认为,分布在地下水埋深较大(>5 m)的沙丘地区以沙蒿为代表的耐干旱植被物种地下水植被生态效应为非敏感型。

3.3 萨拉乌苏组地下水开发利用及环境保护

萨拉乌苏组地下水浅埋,是维系当地生态环境平衡的最主要因素,因此对萨拉乌苏组地下水的开采必须考虑生态环境安全问题,须把因地下水开采引起的

动水位埋深控制在不致发生生态环境恶化的范围内。在滩地地区地下水植被生态效应为敏感型,敏感水位埋深为 3 m,因此埋深 3 m 是地下水开采的约束水位埋深。在保持潜水位埋深 3 m 范围内开采地下水,对湖盆滩地区植被生态环境影响较小;水位埋深超过 3 m,苔草等喜水草本植物根系常坏死,不能下扎,成活率较低,会使滩地植被生态环境发生变化或恶化;过量的开采,随着水位的持续下降,可能造成湖盆滩地植被向沙地植被的演化或退化,甚至消亡,生态环境向沙漠化方向发展。但湖盆滩地区开采地下水引起的水位下降,有利于杨柳等乔灌木的生长,可人工植树造林,种植耐干旱的柠条、沙柳、沙蒿、萎心草、沙打旺等植物,以保持良好的生态环境。

固定半固定或流动半流动沙丘上生长的沙蒿、沙柳、柠条等耐干旱植物,其根系垂直下扎未达到潜水位(沙蒿直根系 1.5 m;沙柳直根系 4～5 m;柠条直根系 2～5 m),只是靠大气降水或包气带的水分维持生命,地下水植被生态效应为非敏感型。以开采量 1×10^5 m^3/d 为例开采潜水,潜水区域水位平均下降 1.24 m,中心地带水位下降 5.59 m。因而,长期大量开采萨拉乌素组潜水,造成的区域水位下降,对沙丘上生长的耐干旱植物不会产生大的影响。

在广大的平缓沙地地区,地下水埋深较沙丘地区浅,地下水植被生态效应表现为不显著敏感型,地下水开采对植被生态虽会产生一定影响,但总体上影响不大。因此,在平缓沙地地区,可在地下水埋深一定范围内(<5 m)将开采量及开采引起的动水位埋深适度扩大,但开采中应加强地下水动态监测,因地制宜的制定和适时调整开采方案。

4　结 论

(1)萨拉乌苏组地下水富集程度主要取决于含水层厚度,厚度越大,地下水富集性越好,二者呈正相关关系;含水层厚度大小主要受基底古凹陷控制,基底古凹陷分布区是地下水富集区。

(2)湖盆滩地区植被覆盖度最大,一般大于 60%,植被类型以苔草等草本植物为主,对潜水位埋深具有较强依赖性;平缓沙地地区,植被覆盖度在 60%～40%,植被类型以沙柳等灌木半灌木为主,植被生长与潜水位埋深虽有一定关系,但不密切;地下水埋深较大(>5 m)的沙丘和流动沙丘地区植被覆盖度一般小于 40%(流动－半流动沙丘上小于 20%),植被类型以沙嵩等耐干旱沙生植物为主,生长基本不依赖地下水,盖度也与潜水位埋深无关。

(3)埋深 3 m 是滩地地区地下水开采的约束水位,过量开采可能造成湖盆滩地植被向沙地植被演替或退化,甚至消亡,加快沙漠化进程;地下水开采对沙地、沙丘上生长的耐干旱植被物种影响较小。

参考文献:

[1] 范立民,王国柱. 萨拉乌苏组地下水及采煤影响与保护[J]. 采矿技术,2016,6(3):422-428.

[2] 周勇. 陕北煤炭基地萨拉乌苏组含水层的特征[J]. 陕西煤炭,2017(4):68-71.

[3] 崔邦军,王西泉,蒋泽泉. 榆神府矿区萨拉乌苏组的水文地质条件分析[J]. 地下水,2011,34(4):93-95.

[4] 王化齐,张茂省,党学亚,等. 基于生态约束的萨拉乌苏组地下水优化管理模型研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(4):21-25.

[5] 马玉蕾,王德,刘俊民,等. 地下水与植被关系的研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(5):36-40.

[6] 郭玉川,杨鹏年,李霞. 干旱区地下水埋深空间分布对天然植被覆盖度影响研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(12):161-165.

[7] 金晓媚,万力,张幼宽,等. 银川平原植被生长与地下水关系研究[J]. 地学前缘,2007,14(3):197-203.

[8] 黄金廷,侯光才,尹立河,等. 干旱半干旱区天然植被的地下水水文生态响应研究[J]. 干旱区地理,2011,34(5):788-792.

[9] Hou G C, Yin L H. Hydrogeology of the Ordos Basin, China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering,2017,5(2):104-115.

[10] 罗亚,徐建华,岳文泽. 基于遥感影像的植被指数研究方法述评[J]. 生态科学,2005,24(1):75-79.

[11] Stow D, Hope A, McGuire D, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems[J]. RemoteSensing of Environment,2004,89(3):281-308.

[12] 侯光才,赵振宏,陈军,等. 鄂尔多斯能源基地地下水及生态环境[M]. 北京:地质出版社,2017.

[13] 张二勇,陶正平,王晓勇,等. 基于植被结构分析法的生态植被与地下水关系研究[J]. 中国地质,2012,39(3):811-817.

[14] 程东会,王文科,侯光才,等. 毛乌素沙地植被与地下水关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(1):185-189.

[15] 杨劲松,王永,闵隆瑞,等. 萨拉乌苏河流域第四纪地层及古环境研究综述[J]. 地质论评,2012,58(6):1121-1130.

[16] 董光荣,李保生,高尚玉. 由萨拉乌苏河地层看晚更新世以来毛乌素沙漠的变迁[J]. 中国沙漠,1983,3(2). :9-14.