

包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征

崔浩浩, 张光辉, 刘鹏飞, 王金哲, 田言亮, 王 茜

Influences of lithology and structure of the vadose zone on groundwater ecological function

CUI Haohao, ZHANG Guanghui, LIU Pengfei, WANG Jinzhe, TIAN Yanliang, and WANG Qian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China

周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

柴达木盆地生态植被的地下水阈值

Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin

党学亚, 卢娜, 顾小凡, 金晓媚 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 1-1

水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table

潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154-163

层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32

民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系

Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin

曹乐, 聂振龙, 刘敏, 卢辉雄, 汪丽芳 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 25-33

地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone

刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锬, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27-36



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202055

崔浩浩, 张光辉, 刘鹏飞, 等. 包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 52-62.
CUI Haohao, ZHANG Guanghui, LIU Pengfei, *et al.* Influences of lithology and structure of the vadose zone on groundwater ecological function[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 52-62.

包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征

崔浩浩^{1,2,3}, 张光辉¹, 刘鹏飞^{1,2,3}, 王金哲¹, 田言亮¹, 王 茜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. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 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: 西北内陆流域下游区天然植被对地下水生态功能具有强烈依赖性, 而包气带岩性结构对地下水生态功能具有明显影响, 但是在目前的研究中, 缺乏定量分析评判。以甘肃石羊河流域下游天然绿洲区为研究区, 基于包气带岩性结构野外调查、室内土柱试验和 Hydrus1-D 数值模拟, 研究包气带岩性结构与地下水耦合作用的生态效应, 分析不同岩性结构包气带获取地下水供水和持水能力差异, 定量对比不同包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征, 得到以下认识: (1) 在地下水水位埋深增大和减小的情况下, 不同包气带岩性结构对地下水生态功能影响不同; (2) 当地下水水位埋深逐渐减小时, 在相同植被条件下, 包气带岩性颗粒越细, 其支持毛细水上升高度和速度越大, 土壤获得地下水的补给水分越快越多, 对地表植被的生长越有利; (3) 当地下水水位埋深大幅增大后, 旱区包气带的有效持水量具有继续维持陆表植被存活的生态效应, 中等岩性颗粒的有效持水量最大, 对维持植被的生态效应最明显。与单一岩性相比, 多种岩性的组合结构有效持水量较大, 生态效应更强。研究结果加深了对包气带在地下水生态功能中调节作用的认识, 可以为旱区水资源的精细化管理及生态保护提供科学依据。

关键词: 干旱区; 天然植被; 包气带岩性结构; 有效持水量; 地下水生态功能

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0052-11

Influences of lithology and structure of the vadose zone on groundwater ecological function

CUI Haohao^{1,2,3}, ZHANG Guanghui¹, LIU Pengfei^{1,2,3}, WANG Jinzhe¹, TIAN Yanliang¹, WANG Qian¹

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*)

Abstract: The natural vegetation in the lower reaches in the inland basins of northwest China is strongly dependent on the groundwater ecological function, and the lithology and structure of the vadose zone has a significant impact on the groundwater ecological function. However, there is a lack of systematic and specific research on how to quantitatively analyze and evaluate the degree of influence. The natural oasis area in the lower reaches of the Shiyang River Basin in Gansu Province is taken as the research area, and field investigation, soil

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-03-17

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0406106); 国家自然科学基金青年基金项目(41807217)

第一作者: 崔浩浩(1985-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 从事水文地质工程地质研究。E-mail: cuihao924@126.com

通讯作者: 王茜(1987-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事生态水文学研究。E-mail: wqianqian@mail.cgs.gov.cn

column test and numerical simulation with Hydrus1-D are carried out to study the ecological effect of the coupling effect between the vadose zone and groundwater. The difference of water supply ability and water holding ability of the vadose zone with different lithologic structure is analyzed, and the influences of lithology and structure of the vadose zone on the groundwater ecological function is quantitatively compared. The results show that (1) the lithological structure of different vadose zones has different effects on the groundwater ecological function when the groundwater depth increases or decreases. (2) When the groundwater depth decreases gradually, under the same vegetation condition, the finer the lithologic particles in the vadose zone, the higher the height and speed of the supporting capillary water rises, and the faster the soil obtains groundwater recharge, and the more beneficial it is to the growth of the surface vegetation. (3) The effective water holding capacity of the vadose zone in the arid area has ecological effect of maintaining the survival of land surface vegetation after the local groundwater depth increases greatly. The effective water holding capacity of the medium lithologic particles is the largest, which has the most obvious ecological effect on maintaining vegetation. Compared with a single lithology, the combination of multiple lithologies is more conducive to hold larger effective water capacity and stronger ecological effect. The results will be helpful to strengthen the understanding of the regulation of the vadose zone in groundwater ecological function, and can provide a scientific basis for the fine management of water resources and ecological protection in arid regions.

Keywords: arid area; natural vegetation; lithology and structure of vadose zone; effective water holding capacity; groundwater ecological function

我国西北内陆流域下游的天然绿洲区, 气候干旱、少雨, 天然植被生存、发育和生态维系对地下水水位埋深十分敏感^[1]。地下水(潜水)直接或通过支持毛细作用向包气带表层输供水分维系天然植被的生态能力或效应, 称之为地下水生态功能。随着人类活动对地下水开发利用程度的不断提高, 一旦地下水天然平衡状态被打破, 地下水失去生态功能, 旱区天然植被将会严重退化, 甚至出现天然绿洲荒漠化^[2-5]。而包气带是连接植被与地下水的重要纽带, 其岩性结构是影响潜水向天然植被根系层输供水分的主要因素之一, 它对地下水生态功能具有重要影响^[6-7]。因此, 包气带岩性结构如何影响地下水生态功能, 不仅是值得探讨的学科前沿问题, 也是西北干旱区地下水生态保护亟待解决的重要问题^[8-9]。

干旱区包气带对生态环境具有重要的意义^[10-11], 这一点众多学者已经达成共识。乔晓英等^[12]分析了地下水生态功能在西北内陆盆地的具体表现, 指出包气带岩性结构不同, 其陆表植被的生态效应也不同, 相对于单一的砂土结构, 粉土和黏土的互层结构更有利于植被的生长。陶正平等^[13]研究了鄂尔多斯盆地风积沙覆基岩型包气带结构及特征, 指出该结构利于土壤水分的富集与保持, 对维持当地的生态系统具有重要作用; 陈敏建等^[14]指出地下水毛细上升高度是计算极限生态水位埋深的关键, 而影响毛细水上升高度

的主要因子是包气带岩性结构(图1)。在相同潜水埋深下, 包气带岩性结构不同, 直接影响地下水通过支持毛细作用向天然植被根系层土壤输供水分的能力^[15], 导致陆表植被具有不同的生态响应。前人关于包气带岩性结构对地下水生态功能的影响研究取得了一定的成果, 定性分析了旱区包气带岩性结构的生态效应, 但是对包气带不同岩性及结构组合的研究尚不全面, 也缺乏对地下水生态功能强弱影响的定量分析。

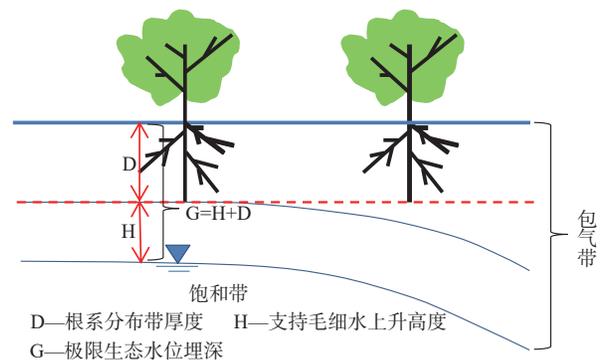


图1 旱区地下水生态功能维系天然植被生态机理简图

Fig. 1 Ecological mechanism of groundwater ecological function maintaining natural vegetation in an arid area

针对上述问题, 本文以甘肃省石羊河流域下游民勤盆地天然绿洲区为重点研究区, 依托国家重点研发计划项目开展的野外调查、室内土柱试验和数值模拟工作, 研究不同包气带岩性结构与地下水耦合作用的

生态效应,分析不同岩性结构包气带获取地下水供水和持水能力差异,定量对比不同包气带岩性结构对地下水生态功能的影响特征。研究结果加深了对包气带在地下水生态功能中调节作用的认识,可以为旱区水资源的精细化管理及生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

石羊河流域下游民勤盆地面积为 $1.59 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其

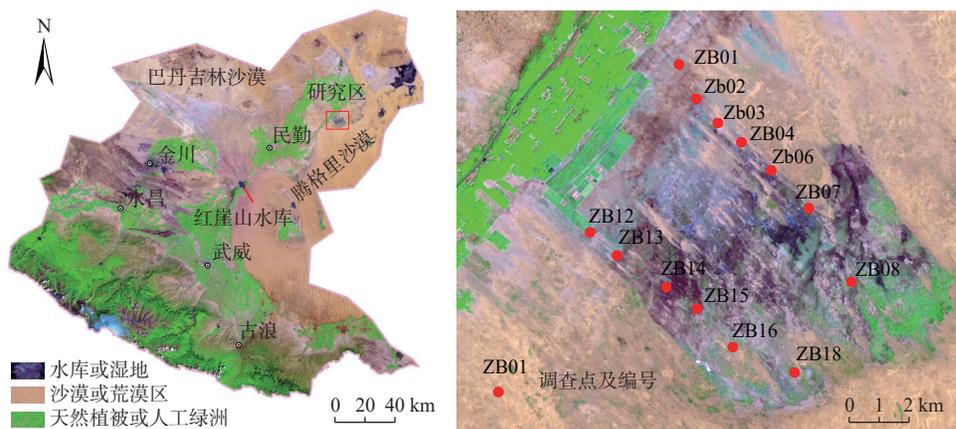


图 2 石羊河流域地形及研究区图

Fig. 2 Topography of Shiyang River Basin and investigation work deployment of study area

“粗下细”多元结构是:包气带上部地层为粗粒的粉细砂、中部为细粒的亚砂土和亚黏土、下部为粗粒的细砂地层,包括细粒土夹层结构(研究区大部分地层为该结构,如图 3 中 ZB01 钻孔)和粗细互层结构(如图 3 中 ZB12 钻孔)。“上细下粗”多元结构是:包气带上部地层为细粒的亚砂土或亚黏土、下部为粗粒的粉细砂或细砂地层;包括粗粒土夹层结构或者粗细互层结构(如图 3 中 ZB13 钻孔)。单一“粗”结构是:包气带上部地层为粉细砂、下部为细砂的粗粒地层。

从图 3 可见,单一“粗”结构包气带主要分布在沙漠边缘,远离沙漠 2 km 之后,出现“上粗下细”的多元结构包气带。在调查点分布方向上,自东南至西北,潜水位埋深逐渐变深;沙漠边缘潜水位埋深约 2 m,邻近农田区潜水位埋深增大至约为 3.5 m。随着潜水位埋深由浅至深,天然植被类型由盐爪爪、黑枸杞和芦苇,过渡为盐爪爪、黑枸杞、怪柳和白刺。

2 研究方法

2.1 包气带岩性结构调查

在国家重点研发计划项目“我国西部特殊地貌区地下水开发利用与生态功能保护”成果——石羊河流

中绿洲面积仅占 6%。区内年均降水量为 113.2 mm,年均蒸发量为 2 675.6 mm,年均气温为 8.8 °C,年均日照时间为 3 142.2 h,是我国西北内陆典型的干旱区,被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围,生态环境极为脆弱^[16-18]。研究区位于民勤盆地农田与腾格里沙漠之间的天然绿洲区,调查点位布置见图 2。

研究区包气带岩性结构主要为“上粗下细”、“上细下粗”的多元结构和单一“粗”结构(图 3)。其中“上

域地下水功能评价与区划的基础上^[19-20],选择荒漠—绿洲过渡带的天然植被区布设 2 条包气带岩性结构详查路线,每条路线长度约 10 km。采用原位探测方法,每个调查点自地表至潜水水面,进行垂向探测,垂向间隔为 20 cm,包括采集土壤样和记录包气带岩性结构,调查点位分布见图 2,调查结果见图 3。然后,以典型点位包气带剖面为基础开展室内土柱释水试验,研究地下水排空条件下,土壤剖面中有效持水量继续维持典型旱区植被的生态效应;以土柱释水试验为原型应用 Hydrus-1D 建立非饱和带水分运移数值模型,适当调整参数并开展了模型的识别和验证,利用校正识别后的模型模拟评估不同包气带岩性结构与地下水耦合作用对陆表植被的生态效应,进而分析包气带岩性结构对地下水生态功能的影响。

2.2 室内土柱释水试验

根据包气带岩性结构调查结果,选择岩性全面、结构完整的点位为代表采集土样,进行室内土柱释水试验。土柱剖面岩性结构是根据野外探查结果适当调整确定,自上而下包气带地层岩性为亚砂土(40 cm)、亚黏土(40 cm)、粉细砂(20 cm)、细砂(50 cm),底部为 25 cm 厚的粗砂作为含水层(图 4),按照原干容重

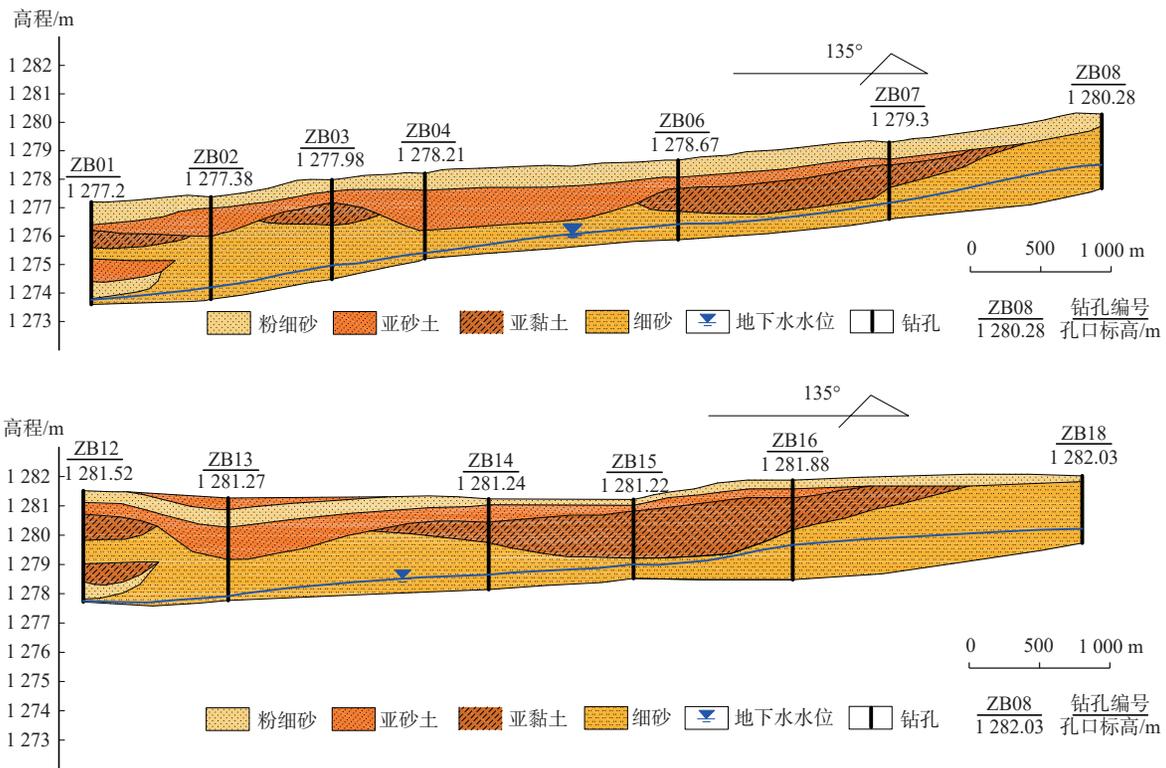


图 3 包气带岩性结构分布特征剖面图

Fig. 3 Profile of lithologic structure distribution in the vadose zone

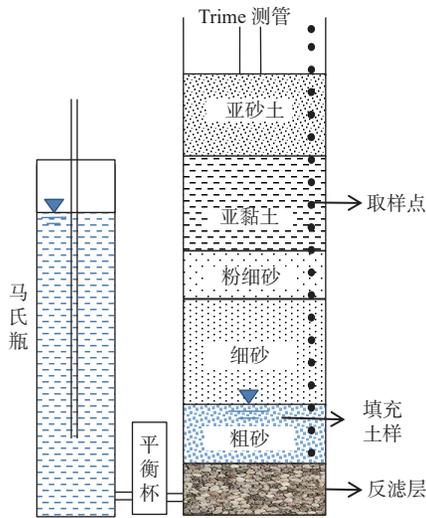


图 4 验证试验(土柱)装置示意图

Fig. 4 Soil column test equipment

每隔 5 cm 进行回填, 层与层间打毛使得接触更紧密。试验土柱高度 200 cm, 内径 20 cm, 自距离土柱顶部 5 cm 位置开始, 向下每隔 10 cm 布设一个取样点, 共 20 个, 取样点孔径为 2 cm, 用橡胶塞封堵。试验土柱中心安装 Trime 土壤含水率测管, 用于实时监测土柱不同深度土壤含水率变化, 测点间距 10 cm。试验结束后, 在各取样点进行取样, 并通过烘干法和 Trime 测试各测点深度的土壤含水率, 利用烘干法和 Trime 测

试的土壤含水率拟合关系, 对试验过程中 Trime 实时测试的土壤含水率进行校正。在毛细水上升过程中, 由马氏瓶向土柱定水头供水; 在释水过程中, 马氏瓶中的水放空, 充当排水装置。

2.3 数值模型

根据天然植被区包气带岩性结构的原位调查结果, 确定多元结构包气带从上到下岩性为“粉细砂、亚砂土、亚黏土和细砂”, 单一结构包气带岩性为“粉细砂和细砂”。求解土壤水分运移模型为 Hydrus-1D 模型基础上增加源汇项的 Richards 方程^[21]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} + 1 \right) \right] - S$$

式中: θ ——土壤体积含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

t ——时间/d;

z ——垂向空间坐标, 向上为正;

φ ——压力水头/cm;

$K(\theta)$ ——水力传导系数/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$);

S ——根系吸水速率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

(1) 初始条件及边界条件

本研究模拟中, 暂不考虑根系吸水, 由此 S 为 0。在潜水支持毛细水上升的模拟中, 设定初始压力水头为 -1.5 MPa, 上边界为定流量边界、流量为零; 下边界

为定水头边界,地下水水位埋深设定为 5 m,模拟时间为 100 d。在土柱释水模拟中,设定土壤剖面含水率的初始条件为 30%,初始地下水水位埋深为 5 m,上边界为定流量边界、流量为零;下边界为自由排水边界,模拟地下水水位埋深大幅增大的情况,模拟时间为 250 d。

(2) 土壤模型结构和水力特性参数

土壤模型结构以土柱释水试验为依据进行识别与校正。土壤水力参数应用 Hydrus-1D 模型的内置模块进行拟合确定。其中残余含水率是利用烘干法实测数据,细砂参数采用内置土壤分类的“sand”参数设

定,其它岩性是根据土壤颗粒组成(表 1),通过 Rosetta 模块预测确定。预测土壤水分运动特征参数^[22],见表 2。

表 1 模拟模型岩性确定依据
Table 1 Lithology of the simulation model

岩性	厚度 /cm	不同岩性粒径占比/%			干容重 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
		0.05 ~ 2 mm	0.002 ~ 0.05 mm	<0.002 mm	
亚砂土	40	75.7	22.0	2.3	1.35
亚黏土	40	46.0	51.6	2.4	1.44
粉细砂	20	86.2	11.9	1.9	1.51
细砂	50	>0.075 mm, 占比85.7%; ≤ 0.075 mm, 占比14.3%			1.60

表 2 校正识别后不同岩性土壤水力特性参数

Table 2 Corrected hydraulic characteristic parameters of different lithology soils

岩性	残余含水率/%	饱和含水率/%	进气值倒数	形状系数	饱和渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)	凋萎含水率/%
亚砂土	3.07	35.99	0.023 9	1.52	117.33	4.62
亚黏土	5.35	34.27	0.005	1.46	47.85	9.32
粉细砂	1.79	37.91	0.045	1.55	305.67	2.79
细砂	1.44	35	0.075	1.5	642.98	2.44

利用校正识别后的参数,在 Hydrus-1D 中分别建立包气带不同岩性结构模型,模拟其毛细水上升过程的供水能力和土柱释水过程的持水能力。在包气带不同岩性单一结构模拟中,建立粉细砂、亚砂土、亚黏土和细砂 4 种模型,设定包气带厚度均为 5 m;在包气带不同组合结构模拟中,建立上粗下细、上细下粗、细粒夹层和粗粒夹层 4 种模型。在上粗下细结构中,上部细砂和下部亚黏土厚度各设为 2.5 m;在上细下粗结构中,上部亚黏土和下部细砂厚度各设为 2.5 m;在夹层结构中,设置夹层厚度(亚黏土或细砂)为 1 m,上部地层厚度(细砂或亚黏土)为 3 m,下部地层厚度(细砂或亚黏土)为 1 m。

(3) 有效持水量

当植物开始发生永久凋萎时的土壤含水率,称为凋萎含水率或萎蔫点^[23-25];当土壤基质势为 -1.5 MPa 时^[26-27],对应的土壤含水率为凋萎含水率。从保障天然植被生态需水角度,凋萎含水率与土壤含水率之间的土壤水量为有效持水量^[28]。本研究中,基于表 2 中土壤水力特性参数,求解各岩性土壤水分特征曲线,进而获得各岩性土壤凋萎含水率,由此计算和获得各岩性土壤有效持水量。

3 结果

3.1 包气带延滞释水的生态效应

选取研究区多元结构包气带不同深度土壤,包括亚砂土、亚黏土、粉细砂和细砂,采样并建立试验土

柱。试验开始之前,在定水头下通过马氏瓶向试验土柱的含水层供水,促使试验土体能够充分获得含水层(潜水)支持毛细水补给。317.45 h 后,支持毛细上升湿润锋不再继续上移,此后开始释水试验,试验结果如图 5 所示。

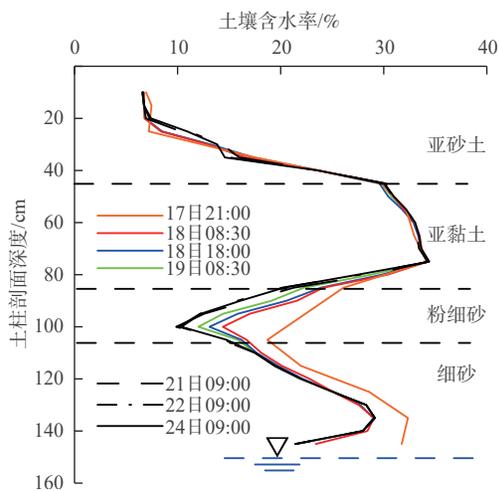


图 5 释水后包气带含水率减降变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of water content in the vadose zone after water release

17 日 21:00 开始释水试验,至次日 8:30 细砂和粉细砂的含水率明显变小,而亚黏土和亚砂土的含水率变化微小。释水过程历时 156 h(至 24 日 9:00),再次测定试验土柱各深度土壤含水率,并与释水前的土壤含水量比较,结果是试验土柱持水量由 340.2 mm 减少至 305.1 mm,可供天然植被吸用的有效持水量为

182.54 mm^[29]。张阳阳等^[30]研究表明适宜生态水位下, 天然植被梭梭生长季内(4—9月)耗水量为 279 mm; 极限生态水位下, 梭梭耗水量为 131 mm。因此, 在地下水水位大幅下降之后, 研究区包气带的有效持水量仍然能够维持天然植被梭梭等生存一个生长季, 确保旱区地下水生态功能有效。

3.2 不同包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征

为了研究包气带延滞释水的生态效应是否具有普遍性, 以土柱试验的包气带结构为原型, 通过 Hydrus-1D 建立数值模型, 利用实测值对模拟值进行识别和验证, 开展不同包气带岩性结构对地下水生态功能影响研究。通过图 6 可以看出模拟值和实测值吻合比较一致, 因此, 可以利用校正识别后的模型参数(表 2)拟合各岩性的土壤水分特征曲线(图 7), 并建立不同包气带结构的数值模型, 研究不同包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征, 包括不同岩性的单一结构、上粗下细结构、上细下粗结构、以及不同质地的夹层结构。

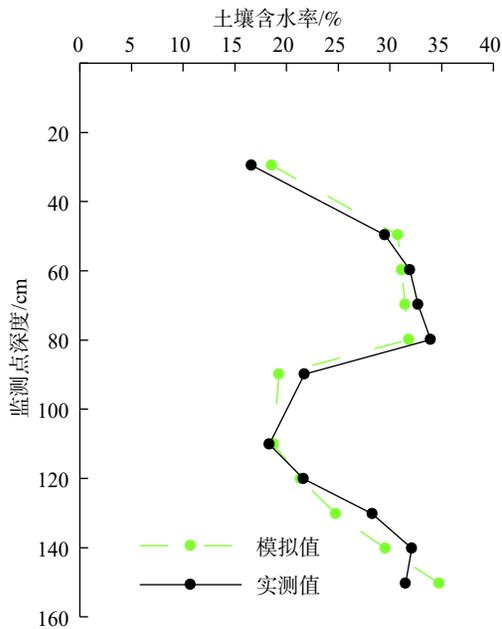


图 6 土柱剖面各监测点土壤含水率模拟值与实测值

Fig. 6 Simulated and measured values of soil moisture content in the soil column profile at each monitoring point

(1) 包气带不同岩性单一结构

植被的极限生态水位埋深为植被根系发育带厚度和支持毛细水上升高度之和^[14]。因此, 在相同植被和地下水水位埋深条件下, 支持毛细水上升高度越高的岩性结构, 其地下水生态功能越强。通过对比 4 种不同包气带岩性单一结构的最大支持毛细水上升高度、累计获得地下水补给量和土壤含水率分布(图 8)

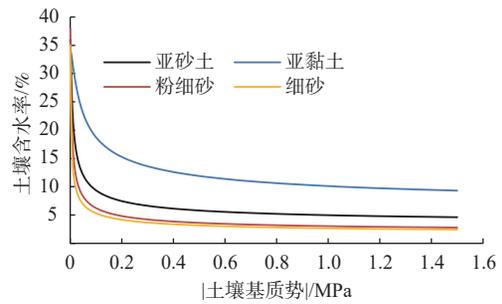


图 7 不同岩性土壤水分特征曲线

Fig. 7 Soil water characteristic curve of different lithologies

注: |土壤基质势|表示土壤基质势的绝对值。

可以看出, 包气带岩性颗粒越细, 其支持毛细水上升高度和速度就越大, 并且土壤获得地下水的补给水分越快越多, 对地表植被的生长越有利。因此, 从地下水支持毛细水上升高度角度, 在 4 种包气带单一岩性结构中, 地下水生态功能强弱为: 亚黏土>亚砂土>粉细砂>细砂。

在初始条件下, 设定包气带不同岩性土壤总持水量相同。从图 9 可以看出, 地下水水位大幅下降后, 包气带不同岩性剖面持水性能不同, 各岩性剖面在前 20 d 内总持水量迅速减少, 然后进行缓慢释水, 在 50 d 之后逐渐趋于稳定。结合各岩性的凋萎含水率, 计算了包气带不同岩性的土壤凋萎含水量和释水 50 d 后的持水量、有效持水量, 见表 3。当包气带中的有效持水量越大时, 其地下水生态功能越强, 从表 3 中可以看出, 地下水水位大幅下降时, 不同岩性的包气带土壤持水量也大幅下降, 但是其有效持水量依然可观, 可以继续维持地表植被存活。以梭梭适宜生态水位埋深下耗水量 279 mm 为例, 各岩性的土壤有效持水量可以维持其一个生长季的存活, 具有明显的正生态效应。虽然释水后细粒亚黏土的土壤持水量最大, 但是有效持水量却是中等颗粒的亚砂土最大。

在地下水不同水位动态条件下, 包气带不同岩性单一结构对地下水生态功能的影响不同。在地下水水位上升时, 细粒岩性毛细水上升速度和高度都优于粗粒岩性, 表现出较强的生态功能; 在地下水水位大幅下降时, 尽管颗粒较细的亚黏土持水量最大, 但是颗粒中等的亚砂土有效持水量最高, 表现出较强的生态功能。

(2) 包气带不同组合结构

包气带常见的结构为层状结构, 主要包括上粗下细、上细下粗、细粒夹层和粗粒夹层等结构。为方便讨论不同结构对地下水生态功能影响特征, 细粒岩性选取亚黏土, 粗粒岩性选取细砂。细粒夹层和粗粒夹

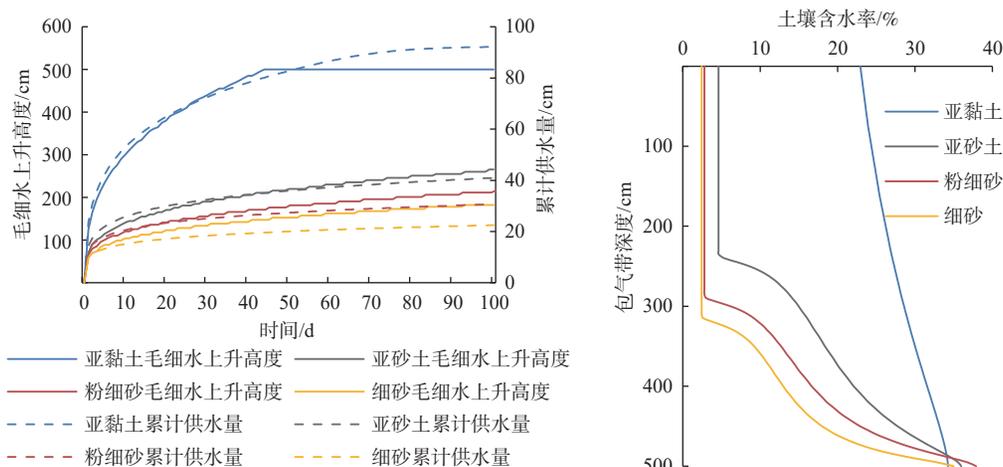


图 8 不同岩性包气带获取地下水供水分能力差异

Fig. 8 Difference characteristics of groundwater supply capacity in the vadose zone with different lithologies

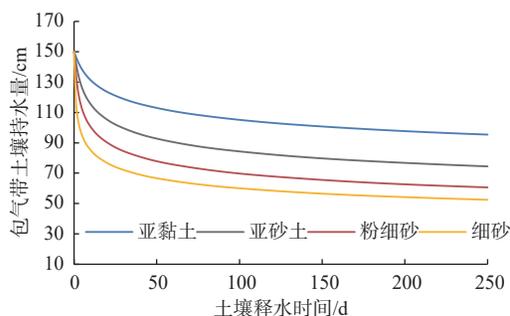


图 9 不同岩性包气带持水能力差异

Fig. 9 Difference of water holding capacity in the vadose zone of different lithologies

层为上粗下细、上细下粗结构的特殊情况,当支持毛细水不能穿透中间夹层时,与上述结构情况相同。因此,在夹层结构模拟中设置夹层厚度为 1 m,以便毛细水能够穿透夹层达到上部地层。利用 Hydrus-1D 设置不同的结构模型进行地下水毛细上升过程模拟和土壤释水过程模拟。除了岩性结构外,其他条件与单一

表 3 释水 50 d 后不同岩性包气带有效持水量

岩性	亚黏土	亚砂土	粉细砂	细砂
土壤凋萎含水量	46.60	23.10	13.95	12.20
土壤持水量	113.00	92.78	77.87	66.67
土壤有效持水量	66.40	69.68	63.92	54.47

注:土壤凋萎含水量=包气带厚度×凋萎含水率;土壤有效持水量=土壤持水量-土壤凋萎含水量。

岩性结构的模拟相同。

通过图 10 发现,相同岩性不同结构的包气带,其对地下水生态功能影响不同。上粗下细结构的毛细水上升高度和地下水累计供水量要远大于上细下粗结构,下部细粒的亚黏土能够通过毛细作用将地下水输送到上部的细砂中,利于地表植被吸水,具有明显的正生态效应。上细下粗结构中,虽然支持毛细水没有达到上部亚黏土,但是下部粗粒细砂支持毛细水上升

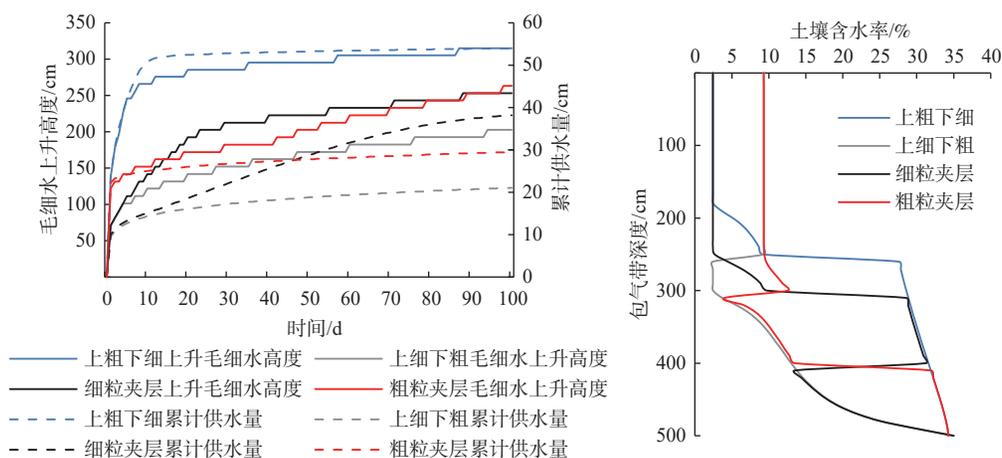


图 10 不同结构包气带获取地下水供水分能力差异

Fig. 10 Difference characteristics of groundwater supply capacity in the vadose zone with different structures

高度(200 cm)比单一岩性的细砂(185 cm)要高15 cm,表明上部细粒的亚黏土对下伏细砂产生了一定的影响,使得地下水生态功能得到一定程度的提升。

从图10可以看出,细粒夹层(250 cm)和粗粒夹层(260 cm)的毛细水上升高度基本相同,但是地下水向二者的剖面累计供水量不同,细粒夹层的累计供水量(38.31 cm)大于粗粒夹层的累计供水量(29.75 cm)。因此,细粒夹层结构具有较强的供水能力,地下水生态功能较强。

在土壤释水过程中,包气带不同岩性结构的土壤持水量随释水时间的动态变化与不同岩性单一结构具有相似的特征(图9和图11)。通过土壤有效持水量计算结果发现表4,包气带结构的组合方式对土壤持水性能具有显著影响,即使岩性完全相同,仅组合结构不同,其有效持水量也会有较大差异。

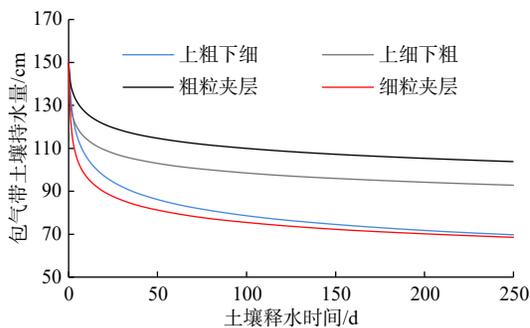


图11 不同结构包气带持水能力差异

Fig. 11 Difference in water holding capacity in the vadose zone of different structures

表4 释水50 d后不同结构包气带有效持水量

Table 4 Effective water holding capacity in the vadose zone of different structures after 50 days of water release /cm

岩性结构	上粗下细	上细下粗	粗粒夹层	细粒夹层
土壤凋萎含水量	29.40	29.40	19.08	39.72
土壤持水量	86.14	102.97	81.24	114.68
土壤有效持水量	56.74	73.57	62.16	74.96

注:土壤凋萎含水量=包气带厚度×凋萎含水率;土壤有效持水量=土壤持水量-土壤凋萎含水量。

当包气带中的有效持水量越大时,其地下水生态功能越强。通过上粗下细和上细下粗结构对比,二者初始持水量和凋萎含水量相同,但是在自由释水50 d后,上细下粗结构释水量较少,有效持水量较多;粗粒夹层和细粒夹层对比,在自由释水50 d后,粗粒夹层有效持水量较多,表明上细下粗和粗粒夹层结构其生态功能较强。综合对比包气带单一岩性和组合结构,在释水后,多种岩性的组合结构有效持水量较大。尤其是通过对比单一亚黏土结构和粗粒夹层,单一细砂结构和细粒夹层,不管夹层的岩性如何,夹层

的存在都使得包气带剖面的有效持水量增加。因此,当地下水水位埋深大幅增大后,多种岩性的组合结构更有利于持有较大的有效持水量,生态效应更强。

4 讨论

在同一研究区域,天然植被类型、地下水水位埋深和气象影响因素基本相同,唯有包气带岩性结构不同。不同的包气带岩性结构对地下水生态功能的影响主要表现在支持毛细水高度不同和潜水位大幅下降过程中植被主根系层土壤释水和含水量减少程度方面。理论上,相同潜水水位埋深下,地下水支持毛细水上升高度越大,地下水供给天然植被根系层土壤水分能力就越强,地下水生态功能则越强;在潜水水位大幅下降过程中,天然植被主根系层土壤释水越慢、含水率减小越少,越有利于维系天然植被生态,地下水生态功能则越强。在西北内陆干旱区,不同植被的适宜生态水位埋深均值为2.9 m,极限生态水位埋深均值为5.5 m^[31]。根据前期在青土湖区开展的地下水水位埋深动态监测数据可知,由于农田灌溉或者未得到及时的人工输水,天然植被区地下水水位埋深会在一段时间内大幅增大,甚至大于极限生态水位(图12)。从图12可知,在青土湖核心区,地下水水位埋深在6—8月时段大于适宜生态水位;在外围区,地下水水位埋深在8—10月时段大于极限生态水位,虽然此时植被无法通过支持毛细作用持续获得地下水的补给,但是包气带的有效持水量会继续维持植被存活一段时间。包气带有效持水量越大,其地下水生态功能越强;待地下水水位埋深逐渐减小时,支持毛细水上升速度越快越有利于对土壤水的补给,其地下水生态功能越强。

在土柱释水试验中验证了包气带中有效持水量具有继续维持典型旱区植被的生态效应;数值模拟中

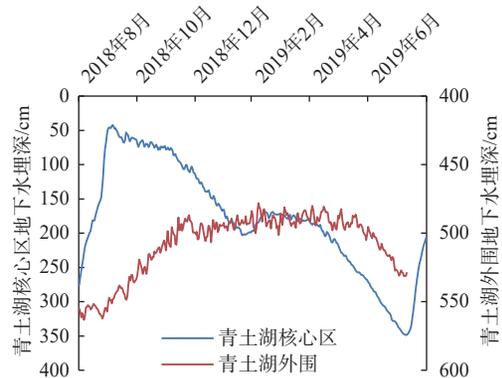


图12 天然植被区地下水水位埋深动态变化规律

Fig. 12 Dynamic response of groundwater depth to artificial water conveyance in the natural vegetation area

分析了包气带不同岩性和结构与地下水耦合作用的生态效应,因此,包气带岩性结构对地下水生态功能具有重要的影响。在包气带单一岩性结构中,颗粒的粗细决定着地下水支持毛细水上升高度和土壤有效持水量,从而影响地下水生态功能。颗粒越细,其支持毛细水上升高度越大,持水量也越大,但是由于其较高的凋萎含水率,细粒岩性的有效持水量不是最高;而中等岩性颗粒的持水量虽然不是最大,但是由于其较低的凋萎含水率,有效持水量反而最高^[32]。根据土壤水分特征曲线可以看出(图 7),在获得相同含水率情况下,岩性颗粒越细,其需要的吸持力越大。因此,细粒岩性土壤对水分具有较高的吸持力,水分不容易被植被利用,而中等颗粒的亚砂土中砂粒和粉粒含量较高,颗粒较粗,虽然总持水量相对较少,但是土壤对水分的吸持力也较小,可供植被吸收利用的水分较多。而粉细砂和细砂以砂粒为主的粗颗粒含量较高,土壤颗粒大不容易吸持水分,持水性能最低。

在包气带不同结构中,不管是上粗下细结构、上细下粗结构还是不同质地的夹层结构,导致其不同地下水生态功能差异的原因就是水分在穿过粗、细岩性界面时发生的不同吸持力的变化。当地下水由下向上运移时,由于细粒对水分的吸持力较大,水分由细粒向粗粒运移时速度会减缓,而水分由粗粒向细粒运移时速度会加快;当地下水由上向下运移时,由于细粒对水分的吸持力较大,以及细粒的渗透性能较差,水分由细粒向粗粒运移或者由粗粒向细粒运移时速度都会减缓,从而加强了包气带延滞释水效应,使得包气带持有的有效水分能够在一段时期内继续供给地表植被,发挥地下水的生态功能。

需要说明的是,上述不同包气带不同组合结构的模拟结果只是针对设定的结构情景。由于不同包气带结构的岩层厚度不同,夹层的岩性、厚度、位置以及层数不同,其毛细水上升高度和持水量也不同^[33],这些因素均会影响地下水生态功能。

5 结论

(1)当地下水水位埋深逐渐减小时,在相同植被条件下,包气带岩性结构不同,其支持毛细水上升高度和速度不同,对地下水生态功能的影响也不同。单一岩性中,颗粒越细,其支持毛细水上升高度和速度越大,土壤获得地下水的补给水分越快越多,对地表植被的生长越有利;其中,亚黏土的毛细水上升高度为 5 m,地下水累计供水量为 92.17 cm,表现出较强的生态效应。不同岩性结构组合的支持毛细水上升高

度比较复杂,因岩性厚度、位置、层数等而异;其中,上粗下细结构的毛细水上升高度为 3.20 m,地下水累计供水量为 54.80 cm,表现出较强的生态效应。

(2)当地下水水位埋深大幅增大后,旱区包气带具有继续维持陆表植被存活的生态效应,不同岩性和结构的包气带其有效持水量均可以维持旱区典型植被(梭梭)存活一个生长季(4—9月),从而拓展了“生态水位”的含义。单一岩性中,包气带岩性颗粒越细,其持水量越大,但是其凋萎含水量也越高;其中,中等岩性颗粒的亚砂土有效持水量最大,为 69.68 cm,对维持植被的生态效应最明显。与单一岩性相比,多种岩性组合结构的有效持水量更大,生态效应更强;其中,粗粒夹层结构有效持水量最大,为 74.96 cm,上细下粗性结构有效持水量次之,为 73.57 cm,表现出较强的生态效应。

因此,充分认识旱区包气带不同岩性和结构在地下水水位埋深增大和减小情况下对地下水生态功能的影响,利用包气带在地下水生态功能中的调节作用,可以为当地水资源的精细化管理和生态保护提供科学依据。

参考文献 (References) :

- [1] 孙自永,王俊友,葛孟琰,等.基于水稳定同位素的地下水型陆地植被识别:研究进展、面临挑战及未来研究展望[J].地质科技情报,2020,39(1):11-20. [SUN Ziyong, WANG Junyou, GE Mengyan, et al. Isotopic approaches to identify groundwater dependent terrestrial vegetation: Progress, challenges, and prospects for future research[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2020, 39(1): 11 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王文科,宫程程,张在勇,等.旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J].地球科学进展,2018,33(7):702-718. [WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 702 - 718. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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):16-20. [WU Xuanmin, SHI Shengsheng, LI Zhiheng, 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 - 20. (in Chinese with English abstract)].

- [4] 凤蔚, 李文鹏, 邵新民, 等. 黑河流域中游盆地地下水动态特征及其调蓄能力分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 11 - 21. [FENG Wei, LI Wenpeng, SHAO Xinmin, et al. Research on the dynamic characteristics of groundwater and regulation capability of aquifers in the intermediate section of Heihe River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 11 - 21. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LIU M, NIE Z L, CAO L, et al. Comprehensive evaluation on the ecological function of groundwater in the Shiyang River watershed[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2021, 9(4): 326 - 340.
- [6] HUANG F, ZHANG Y, ZHANG D, et al. Environmental groundwater depth for groundwater-dependent terrestrial ecosystems in arid/semiarid regions: A review[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16: 763.
- [7] 王金哲, 张光辉, 王茜, 等. 西北干旱区地下水生态功能评价指标体系构建与应用[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1573 - 1581. [WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, WANG Qian, et al. Construction and application of evaluation index system of groundwater ecological function in northwest arid area[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1573 - 1581. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 崔浩浩, 张冰, 冯欣, 等. 不同土体构型土壤的持水性能[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 1 - 5. [CUI Haohao, ZHANG Bing, FENG Xin, et al. Soil water-holding properties of different soil body configuration[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 葛建, 黄德文, 高旭, 等. 分层土壤的持水性能研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(9): 2126 - 2132. [GE Jian, HUANG Dewen, GAO Xu, et al. Water retention capacity of drained soil columns with grained layers[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(9): 2126 - 2132. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 贾利民, 郭中小, 龙胤慧, 等. 干旱区地下水生态水位研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 187 - 193. [JIA Limin, GUO Zhongxiao, LONG Yinhui, et al. Research advances in ecological groundwater level in arid areas[J]. Ecological Science, 2015, 34(2): 187 - 193. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 赵文智, 周宏, 刘鹤. 干旱区包气带土壤水分运移及其对地下水补给研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(9): 908 - 918. [ZHAO Wenzhi, ZHOU Hong, LIU Hu. Advances in moisture migration in vadose zone of dryland and recharge effects on groundwater dynamics[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(9): 908 - 918. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 乔晓英, 王文科, 姜桂华, 等. 西北干旱内陆盆地地下水生态功能的探讨[J]. 水资源保护, 2005(5): 6 - 10. [QIAO Xiaoying, WANG Wenke, JIANG Guihua, et al. Study on ecological function of groundwater in northwest arid inland basin[J]. Water Resources Protection, 2005(5): 6 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陶正平, 黄金廷, 崔旭东. 鄂尔多斯盆地北部风积沙覆盖基岩型包气带结构的生态意义[J]. 地下水, 2007(6): 54 - 55. [TAO Zhengping, HUANG Jinting, CUI Xudong. The Eco-significance of the Sand-sandrock Vadose Zone Structure in the North of the Erdos Basin[J]. Groundwater, 2007(6): 54 - 55. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈敏建, 张秋霞, 汪勇, 等. 西辽河平原地下水补给植被的临界埋深[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 24 - 33. [CHEN Minjian, ZHANG Qiuxia, WANG Yong, et al. Critical depth of recharge of the vegetation by groundwater in the West Liaohe Plain[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 24 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 周宏. 干旱区包气带土壤水分运移能量关系及驱动力研究评述[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6586 - 6597. [ZHOU Hong. Review of studies on the relationship between soil water movement and energy and their driving forces in the vadose zone of arid regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6586 - 6597. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 钱鞠, 常娟, 马海燕, 等. 民勤县水资源综合规划报告[R]. 兰州: 兰州大学, 2013. [QIAN Ju, CHANG Juan, MA Haiyan, et al. Comprehensive water resources planning of Minqin County[R]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)]
- [17] HUANG F, OCHOA C G, CHEN X, et al. Modeling oasis dynamics driven by ecological water diversion and implications for oasis restoration in arid endorheic basins[J]. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125774.
- [18] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 25 - 33. [CAO Le, NIE Zhenlong, LIU Min, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 25 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王金哲, 张光辉, 严明疆, 等. 干旱区地下水功能评价与区划体系指标权重解析[J]. 农业工程学报, 2020,

- 36(22): 133 - 143. [WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, YAN Mingjiang, et al. Index weight analysis of groundwater function evaluation and zoning system in arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 133 - 143. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王金哲, 张光辉, 崔浩浩, 等. 适宜西北内陆区地下水功能区划的体系指标属性与应用[J]. 水利学报. 2020, 51(7): 796 - 804. [WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, CUI Haohao, et al. System index attribute and application of groundwater function zoning in northwest inland area of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 796 - 804. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 基于HYDRUS-1D模型的荒漠绿洲水盐运移模拟与评估[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 87 - 98. [WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Simulation and evaluation of soil water and salt transport in desert oases of Hetao Irrigation District using HYDRUS-1D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 87 - 98. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 钟韵, 费良军, 傅渝亮, 等. 多因素影响下土壤上升毛管水运动特性HYDRUS模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 83 - 89. [ZHONG Yun, FEI Liangjun, FU Yuliang, et al. HYDRUS simulation and verification of movement characteristics of upward capillary water flow in soil as affected by multi-factor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 83 - 89. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 乔照华. 土壤凋萎系数的影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008(2): 82 - 84. [QIAO Zhaohua. Study on the influence factors of wilting point[J]. Journal of Water Resources and Water engineering, 2008(2): 82 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [24] TA SAN S, DEMIR Y. Comparative Analysis of MLR, ANN, and ANFIS Models for Prediction of Field Capacity and Permanent Wilting Point for Bafra Plain Soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51: 604 - 621.
- [25] OSTOVARI Y, ASGARI K, CORNELIS W. Performance evaluation of pedotransfer functions to predict field capacity and permanent wilting point using UNSODA and HYPRES Dataset[J]. Arid Land Research and Management, 2015, 29: 383 - 398.
- [26] 王鑫, 肖武, 刘慧芳, 等. 锡林浩特矿区土壤水分特征曲线和有效含水量预测[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 169 - 177. [WANG Xin, XIAO Wu, LIU Huifang, et al. Soil moisture characteristic curve and prediction of available water content of overburden in Xilinhote Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 169 - 177. (in Chinese with English abstract)]
- [27] WIECHETECK L H, GIAROLA N F B, DE LIMA R P, et al. Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (-15, 000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures[J]. Agricultural Water Management, 2020, 230: 105965.
- [28] 白致威, 段兴武, 丁剑宏, 等. 土壤有效含水量的经验估算模型——以黑土为例[J]. 中国农学通报, 2015, 31(20): 153 - 159. [BAI Zhiwei, DUAN Xingwu, DING Jianhong, et al. Experience estimation model of soil available water-holding capacity: A case study of black soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(20): 153 - 159. (in Chinese with English abstract)]
- [29] CUI H, ZHANG G, WANG J, et al. Influence of multi-layered structure of vadose zone on ecological effect of groundwater in arid area: A case study of Shiyang River Basin, Northwest China[J]. Water, 2022, 14: 59.
- [30] 张阳阳, 陈喜, 高满, 等. 内陆干旱区典型旱生植物蒸腾耗水量模拟研究[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7751 - 7762. [ZHANG Yangyang, CHEN Xi, GAO Man, et al. Simulation of transpiration for typical xeromorphic plants in inland arid region of Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7751 - 7762. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 张阳阳, 陈喜, 高满, 等. 基于元数据分析的西北干旱区生态地下水水位埋深及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(5): 57 - 65. [ZHANG Yangyang, CHEN Xi, GAO Man, et al. Meta-analysis of ecological depth to groundwater table and its influencing factors in arid region of northwest China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 57 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. [SHAO Mingan, WANG Quanjiu, HUANG Mingbin. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)]
- [33] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 层状土壤毛管水最大上升高度分析[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 94 - 97. [SHI Wenjuan, SHEN Bing, WANG Zhirong, et al. Maximum height of upward capillary water movement in layered soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(1): 94 - 97. (in Chinese with English abstract)]