

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

### 黄土塬区包气带水分运移特征研究

吴玮江, 宋丙辉, 刘 迪, 安亚鹏

Research on the characteristics of water transport in the aeration zone of loess tableland

WU Weijiang, SONG Binghui, LIU Di, and AN Yapeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208008

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征

Influences of lithology and structure of the vadose zone on groundwater ecological function 崔浩浩, 张光辉, 刘鹏飞, 王金哲, 田言亮, 王茜 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 52-62

### 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

### 基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149

### 黄土与其矿物颗粒表面水膜类型及其定量表征

Types of water film on the surface of loess and related mineral particles and their quantitative characterization 刘佳婷, 付昱凯, 李同录, 赵晨曦, 李萍, 侯晓坤, 胡向阳 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 105-113

### 典型地貌区原状黄土孔隙细观特征研究

Research on pore microscopic characteristics of undisturbed loess in typical geomorphologies 刘钊钊, 钟秀梅, 张洪伟, 高中南, 梁收运, 王谦 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 148-148



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208008

吴玮江, 宋丙辉, 刘迪, 等. 黄土塬区包气带水分运移特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 12-22. WU Weijiang, SONG Binghui, LIU Di, *et al.* Research on the characteristics of water transport in the aeration zone of loess tableland[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 12-22.

# 黄土塬区包气带水分运移特征研究

吴玮江<sup>1</sup>,宋丙辉<sup>2</sup>,刘 迪<sup>1</sup>,安亚鹏<sup>1</sup>

(1. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,甘肃兰州 730000;

2. 自然资源部第一海洋研究所,山东青岛 266061)

摘要: 在我国西北黄土高原的黄土塬、黄土台塬区赋存有较丰富的黄土潜水,大气降水垂直入渗是其主要补给来源,但对 水分赋存和运移的空间通道认识尚有不足。文章基于董志塬、渭北黄土台塬的地貌、地层结构等水文地质条件、地下水利 用动态和相关试验资料,结合黄土扫描电镜图像处理与统计分析,对黄土塬区黄土潜水和包气带水分运移的孔隙特征、过 程进行了探讨并分带。研究认为孔隙是黄土地下水的主要赋存、运移的空间通道,其最小渗透等效孔径约为12 µm。由孔 隙发育的马兰黄土构成的黄土包气带垂向结构组合有利于大气降水的入渗,包气带孔隙中的水分运移非常微弱缓慢,但 较为连续均匀。黄土包气带可划分为气候影响带、储存调节带、缓慢运移带和毛细接收带4个带,除上部气候影响带外, 其余三带处于基本稳定的水分运移动平衡状态。研究成果可为全面系统地认识黄土塬区包气带水分运移特征提供参考和 借鉴。

关键词:黄土;孔隙;包气带;水分运移;地下水 中图分类号: P641.6 文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0012-11

# Research on the characteristics of water transport in the aeration zone of loess tableland

WU Weijiang<sup>1</sup>, SONG Binghui<sup>2</sup>, LIU Di<sup>1</sup>, AN Yapeng<sup>1</sup>

Geological Hazards Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;
 First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: There are abundant phreatic water in loess tablelands in the Loess Plateau of northwest China. The vertical infiltration of atmospheric precipitation is the main source of the recharge, but the spatial channels of water occurrence and migration in loess are still ambiguous. Based on the geomorphology, strata structure and other hydrogeological conditions, groundwater utilization condition and related experimental data of the Dongzhiyuan and Weibei loess tablelands, combined with scanning electron microscope image processing and statistical analysis, the pore characteristics and the migration processes of water in the loess phreatic and aeration zones are discussed and zoned. Pores are considered to be the main space channel for the occurrence and migration of loess groundwater, and the minimum equivalent pore size of seepage is about 12 µm. The vertical structural combination of the loess aeration zone composed of the Malan loess with developed pores in the upper part is

基金项目:国家自然科学基金项目(42007274; 42067066);甘肃省科学院项目(2022JK-04)

收稿日期: 2022-08-06; 修订日期: 2022-10-15 投稿网址: www.swdzgcdz.com

第一作者:吴玮江(1963-),男,研究员,主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail:wwj0408@163.cn

通讯作者: 宋丙辉(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: bhsong@fio.org.cn

conducive to the infiltration of atmospheric precipitation, and the water migration in the pores of the aeration zone is very weak and slow, but is relatively continuous and uniform. The aeration zone can be divided into four zones for loess: the climate impact zone, storage regulation zone, slow runoff zone and capillary receiving zone. Except for the upper climate impact zone, the other three zones are in a basically dynamic equilibrium state of water transport. The research results can provide important references for comprehensively and systematically understanding the characteristics of water transport in the aeration zone of loess tablelands.

Keywords: loess; pore; aeration zone; water transport; groundwater

在我国西北黄土高原地区,特别是黄土塬和黄土 台塬地区黄土中赋存较丰富的地下水,20世纪60-70年代开展了大量的黄土水文地质调查和勘察工作, 研究认为黄土地下水的补给来源主要是大气降水[1-3]。 黄土孔隙、裂隙发育,但大气降水在巨厚而复杂的黄 土包气带中通过什么空隙通道以及如何补给黄土潜 水的认识长期以来还不清楚,曾被称为"黑箱"。20世 纪80-90年代,许多学者在黄土塬区针对该问题进行 了专题研究,并开展了黄土包气带水分运移的长期观 测,主要存在两种不同认识,一种认为:黄土地下水为 黄土孔隙裂隙水,孔隙储水,裂隙导水,大气降水主要 通过裂隙补给黄土潜水[4-7]。另一种认为:黄土节理 裂隙主要发育在土体干燥且临空条件好的塬边等地 带;黄土地下水主要分布在黄土塬中心区,黄土处于 饱和或高含水状态,节理裂隙不发育,黄土地下水的 赋存与运移以孔隙为主,裂隙的作用微小,大气降水 主要通过孔隙补给黄土潜水;同时引入了基质势理论[8-9], 利用压汞试验、微结构图像处理技术对地下水可渗透 的最小黄土孔径进行了测试分析[10-11]。

近十几年来,黄土地下水运移也受到工程地质、 土壤学等学科的重视,扫描电镜、CT等先进微观测试 技术和优先流、优势通道等新理论大量引入<sup>[12-16]</sup>,并 取得了许多新的认识。如张建丰等<sup>[12]</sup>论述了黄土大 孔隙在土壤水分运动中的作用及理论模式,指出降水 (或灌溉)向黄土入渗时产生优先的渗流通道是必然 的;赵宽耀等<sup>[13]</sup>揭示了高强度灌溉条件下黄土优势通 道中水的渗流过程,发现水优先入渗至优势通道内, 同时在顶部进行基质流入渗;李鑫<sup>[14]</sup>利用 CT 扫描构 建了黄土三维空隙结构模型,结合逾渗理论揭示了黄 土中优先流运动的行为过程,发现约 22% 的黄土喉道 为优先流通道;王雨山等<sup>[15]</sup>认为黄土地下水补给以活 塞流为主,而优先流占比较低;李喜安等<sup>[16]</sup>揭示了黄 土地层地表径流的下潜规律,提出了 4 种地表径流下 潜模式。然而上述研究对黄土包气带水分运移的孔 径大小、优势通道的发育特征与作用、优先流在巨厚 黄土包气带中产生的空间范围等方面还存在认识差 异,另外,对黄土包气带水分运移问题的全面性和系 统性认识也显得不足。

作者在收集整理不同领域、不同地区相关资料的 基础上,通过长期的野外调查、试验,综合研究认为黄 土包气带水分运移受地形地貌和气候等条件影响,具 有地带性、区域性差异。在降水量较大的黄土塬、黄 土台塬和黄土宽梁区大气降水、灌溉水主要通过孔隙 入渗补给黄土潜水;在黄土梁峁区大气降水主要通过 节理裂隙和落水洞等宏观优势通道入渗补给<sup>[17]</sup>。

基于上述认识,本文通过董志塬、渭北黄土台塬 等典型塬区的水文地质条件、地下水利用动态与相关 试验资料,结合黄土扫描电镜图像处理与统计分析, 采用宏微观相结合的综合研究方法对黄土塬区黄土 潜水和包气带水分运移的孔隙特征、运移过程进行了 探讨,并基于水分运移过程对包气带进行了分带,取 得了一些新认识。

# 1 黄土塬区黄土潜水特征

### 1.1 黄土潜水基本特征

西北黄土高原区黄土潜水的分布与地貌关系密 切,董志塬、洛川塬等黄土塬、渭北黄土台塬和规模 较大的黄土梁区的黄土中赋存较丰富的黄土潜水。 黄土潜水的区域分布也受气候的影响,由西北向东南 黄土高原区气候由半干旱气候过渡为半湿润气候,随 着降水量的增加,黄土潜水也更加丰富<sup>[1]</sup>。

甘肃董志塬面积约828 km<sup>2</sup>,号称世界第一黄土大 塬。塬区黄土潜水大范围连续分布,地下水水位埋深 30~80 m,含水层主要分布在离石黄土上部,厚度30~ 50 m,隔水层为离石黄土下部和午城黄土<sup>[18]</sup>(图1)。 地下水由塬中心向塬边径流,在塬边以泉水和面状渗 流的形式排泄,泉水流量一般在5~20 m<sup>3</sup>/d,且动态较 为稳定(图2)。20 世纪70 年代以来董志塬区有黄土 潜水机井近千眼,单井出水量一般在 100~500 m<sup>3</sup>/d, 塬中心有的单井出水量可达 1 000 m<sup>3</sup>/d 以上,近年来 取水量约为 3 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a。通过抽水试验等方法求 得黄土含水层的给水度为 0.07~0.15<sup>[18-19]</sup>。塬区黄土 潜水运移非常缓慢, 2018 年在董志塬董志乡施工 4 个 水文地质钻孔进行弥散试验,钻孔水平间距 5~10 m, 地下水水位差 10 cm,在地下水水位最高的钻孔中投 入 NaCl 试剂, 天然状态下, 3 个月后观测孔中并未检 测到 NaCl 的扩散和运移,在其中 1 个观测孔中抽水 3 h 后才检测到 NaCl。



tableland<sup>[18]</sup>



图 2 董志塬塬边面状渗出的黄土潜水 Fig. 2 Phreatic water seeps along the edge of the Dongzhiyuan loess tableland

1.2 降水入渗补给与地下水动态

董志塬为典型的黄土高原,四周孤立,塬边沟谷 切割深度为250~300 m,沟底基岩出露。大气降水是 黄土潜水的主要补给来源。董志塬地区多年平均降 水量为550 mm,年最大降水量828.2 mm(2003年)。 降水年内分配不均,主要集中在7—9月,降水形式多 为暴雨、连阴雨。如1988年7月22—23日董志塬驿 马、董志等乡镇150 min 降水210~240 mm<sup>[20]</sup>。

天然情况下,降水可以通过孔隙以面状形式(活 塞流)在黄土包气带上部入渗到一定深度(图 3)。2021 年9月以来陇东黄土高原连续降水,其中10月3—4 日什字塬最大降水量达170 mm。一个月后在黄土塬 开挖探井并取样测试发现,土体含水率多超过田间持 水率,降水入渗深度可达7m(图4)。类似地,2003年 黄土高原洛川塬年降水量达到877mm,超出平均年降 水量250mm,降水入渗黄土深度也达5~7m<sup>[21]</sup>。当暴 雨在塬面低洼部位形成地表积水时,沿节理裂隙优势 通道可产生明显的优先流,更有利于降水入渗。



图 3 黄土塬面降水的面状入渗 Fig. 3 Infiltration of precipitation on loess tableland surface



Fig. 4 Precipitation infiltration in the loess areation zone

陕西宝鸡峡渭北黄土台塬灌溉区黄土包气带厚 20~30m。20世纪70年代初开始灌溉,约3a后地下 水水位开始普遍上升,20世纪80年代初部分地表低 洼部位出现明水。另外,在黄土地区工程勘察中也做 了众多的大型黄土湿陷渗水试验,注水量在数千至数 万方。高强度、长时间的入渗水体主要通过黄土包气 带孔隙渗入,渗入深度可达20~30m。如某场地黄土 厚度为25m,当连续浸水到第35d时14m深度处土 层体积含水率明显增加,接近40%(图5)<sup>[22]</sup>。总体来 60

50

40

30

2 m

体积含水率/%





图 5 黄土渗水试验体积含水率曲线



看,灌溉和渗水试验反映出通过黄土包气带水分运移 补给地下水的缓慢性和均匀性<sup>图</sup>。

根据地下水长期观测资料,董志塬黄土潜水动态 较为稳定,基本不受降水季节性变化的影响,仅局部 受人为开采影响,水位有所波动(图 6)。

综上可知,黄土塬区大气降水可以入渗到包气带 中一定深度补给下部黄土潜水,潜水主要是赋存在黄 土孔隙中运移的孔隙水,天然动态较为稳定,不受降 水季节性变化的影响,经由塬边泉水面状稳定渗出, 运移非常缓慢,而黄土中裂隙的储水、导水作用比较 微弱。



Fig. 6 Dynamic variations of phreatic water levels in the Dongzhiyuan loess tableland

### 2 黄土空隙发育特征

### 2.1 黄土塬区节理裂隙发育特征

黄土的重要特征之一是节理裂隙发育,但野外观 察到的黄土节理裂隙主要发育在黄土塬边、陡崖等特 殊地貌部位,受土体侧向卸荷、失水体积收缩等机制 控制,开启程度一般较高。理论分析认为,在黄土塬、 台塬中心地带和深部含水率高的黄土处于软塑—可 塑状态,节理裂隙并不甚发育,加之受边界条件的限 制地应力难以得到释放,在自重压力的长期作用下土 体产生较强的塑性变形,即使黄土中原来发育的构造 节理、原生节理等也多处于闭合状态,对给水度的贡 献很小。如新建银西高铁南北两端以隧道形式穿越 董志塬,数千米长的隧道位于黄土含水层中,探地雷 达资料显示黄土中宏观节理裂隙不发育,施工中虽然 也发现有部分节理裂隙,但宽度很小,多处于闭合状 态,施工掌子面地下水呈面状渗出,流量总体稳定,土 体向临空侧的塑性挤出非常明显<sup>[23-24]</sup>。彭建兵等<sup>[25]</sup> 利用平硐探查了泾阳南塬、白鹿塬边离石黄土中节理 发育情况,发现平硐内一般发育8~12条节理裂隙,

宽度多在 0.5~2.0 cm, 个别大于 10.0 cm, 按照最大节 理裂隙宽度计算, 线裂隙率约为 0.50%~0.65%。李云 峰<sup>[11]</sup> 对洛川塬边 10 处马兰黄土中节理裂隙进行了统 计, 显示黄土面裂隙率仅为 0.26%。本文作者统计了 陇东黄土塬边几处陡崖发育的节理裂隙, 线裂隙率也 仅在 0.4%~0.6% 之间。

值得注意的是,在黄土表层1~2m干燥范围内普 遍发育的风化节理是一种入渗优势通道,可以产生优 先流,提高黄土的渗透性,增加地表水入渗量和入渗 深度。

2.2 黄土孔隙发育特征

黄土是一种在干旱半干旱气候环境形成的以粉 粒为主的特殊粉质黏土或粉土,孔隙和大孔隙发育是 其基本特征之一,孔隙率一般在42%~55%之间<sup>[26]</sup>。 黄土的孔隙率有随深度增加而减小的趋势,同时古土 壤的孔隙率小于黄土的孔隙率(图7)。

黄土沉积过程缓慢,年均沉积厚度不足1mm,自 重压密作用微弱,有利于形成大孔性疏松土体结构。 此外,黄土缓慢沉积过程中伴随不同程度的土壤化作 用,其结构同时受到生物、气候等作用的充分改造,形





成了非沉积型的特殊土壤孔隙、孔洞和微裂隙。黄土 中的孔隙类型主要有:粒间孔隙、结构孔隙、根孔、虫 孔等<sup>[26-27]</sup>,尺寸变化很大,有些大孔隙肉眼可见(图 8), 但绝大部分微小的粒间孔隙、结构孔隙需借助显微 镜、扫描电镜进行识别(图 9)。



图 8 黄土中的大孔隙、孔洞 Fig. 8 Macropores and cavities in loess



图 9 黄土中的结构孔隙(电镜放大 1 000 倍) Fig. 9 Structural pores in loess (SEM ×1 000)

20世纪80年代高国瑞<sup>[28]</sup>、雷祥义<sup>[29]</sup>等利用显微 镜、压汞测孔法研究了黄土的孔隙大小、含量及比 例,并对孔隙进行了分类。在孔隙结构分类方面:高 国瑞<sup>[28]</sup>将微观黄土孔隙分为粒间孔隙和架空孔隙,雷 祥义<sup>[29]</sup>将其分为支架孔隙、镶嵌孔隙及胶结物孔隙 等。其中架空孔隙、支架孔隙应是同一种孔隙,也称 为结构孔隙。

在孔隙成因分类方面: 雷祥义<sup>[29]</sup> 根据成因将孔隙 分为原生和次生2类, 原生微观孔隙由支架孔隙、镶 嵌孔隙及胶结物孔隙等3类组成, 其中支架孔隙的孔 径较大, 形状不规则, 且不稳定; 大型空洞为黄土风 化过程中经物理、化学、生物等共同作用形成的次生 孔隙, 主要以根孔、蚁穴、鼠穴、虫洞、微裂隙等形式 存在。

在孔隙大小分类方面: 雷祥义<sup>[29]</sup>、王永焱等<sup>[27]</sup>基 于压汞测孔资料按照孔隙直径 *D* 将孔隙分为: 大孔隙 (*D*≥32 μm), 中孔隙(8 μm≤*D*<32 μm), 小孔隙(2 μm≤ *D*<8 μm)和微孔隙(*D*<2 μm), 其中大、中孔隙主要为 结构孔隙。

西北黄土高原黄土形成于第四纪不同时期,堆积 范围较广,不同地区、不同时代的黄土地层孔隙特征 变化较大,总体由西北向东南呈粒间孔隙减少、结构 孔隙增加的趋势,由老到新呈孔隙率增加、孔隙孔径 增大的趋势。

以上研究主要涉及各类孔隙与黄土湿陷之间的 关系,与黄土地下水运移的关联性研究比较薄弱。

### 3 黄土孔隙最小渗透等效孔径

黄土的透水性与孔隙大小、含量多少和连通性有 关。不同大小的孔隙中所含水的性质不同,小孔隙通 常可能被不能自由运动的结合水充填,只有孔隙直径 大于一定程度并连通性良好时,孔隙中才含有能够自 由运动的重力水,因此确定地下水可以自由运移的临 界黄土孔径非常有意义。不同文献中临界孔隙直径 的研究结论存在较大差异:有研究发现当孔喉半径小 于 2.75 μm时,孔隙中的液体基本上不发生渗流<sup>[30]</sup>; 李云峰<sup>[31]</sup>通过微机图像测孔统计分析了单个黄土孔 隙面积与渗透系数的关系,认为面积大于 557 μm<sup>2</sup> 的 孔隙是透水孔隙,黄土此类孔隙含量约 15%~21%;李 鑫<sup>[14]</sup>通过 CT 测试和孔隙网络模型计算判定黄土中发 生优先流的临界孔隙直径为 13.9 μm。黄土孔隙连通 性方面的研究程度较低,一般认为,孔隙连通率可达 70%,其中小孔隙连通性较好,大孔隙连通性较差<sup>[14]</sup>。 给水度是衡量单位体积土体中储存并释放重力 水多少的重要参数,反映了土体孔隙的连通性。基于 以往研究资料,黄土含水层给水度一般为0.07~0.15, 即黄土饱水带中体积分数7%~15%的孔隙中的重力 水可以运移并释放。银西高铁驿马一号隧道从董志 塬北部黄土含水层中通过,利用管井抽水降低地下水 水位以疏干黄土含水层,检测发现隧道掌子面黄土质 量含水率(wg)平均值由31.14%降低到24.40%,减少 了6.74%,换算成体积含水率为10.72%,与黄土含水层 的给水度相当<sup>[32]</sup>。

由此可见, 饱水带黄土水分可运移的孔隙含量为 7%~15%, 其中水分可运移的孔隙含量越高对应的渗 透等效孔径越小, 选取上限值 15% 对应的孔隙等效直 径作为饱水带黄土释水的最小渗透等效孔径, 由于天 然黄土孔隙率一般在 42%~55% 之间, 因此可运移水 分的孔隙含量约占天然黄土孔隙率的 1/3。

不同于三维概念的黄土给水度,扫描电镜获取的 是黄土二维平面微观结构。为将给水度概念推广应 用于二维空间,假定黄土二维孔隙率(孔隙面积/土样 面积)等效于黄土给水度,以二维累积孔隙率占总孔 隙率的1/3为标准评估黄土水分可运移的最小孔隙等 效直径。分别在董志塬中心的西峰城区南部和北部 驿马镇的探井中采取马兰黄土、离石黄土上部样品 6组,利用扫描电子显微镜获取了每组土样的典型微 结构图像,根据黄土颗粒及其孔隙大小,选择代表性 微结构图像(放大 200 倍)利用定量化图像分析软件 ImageJ 开展黄土孔隙特性测量和统计分析,结果见 图 10。孔隙特性测量包括图像校准、比例尺设定、二 值化分割以及孔隙特性统计分析等步骤<sup>[30]</sup>。

根据图 10 中的累积孔隙率分布曲线,由大到小统 计黄土可渗透最小等效孔隙直径(表 1),1#样最大值 为 14.2 μm,8#样最小值为 12.2 μm,黄土对应的可渗透 最小等效孔隙直径一般约为 12.2~14.2 μm,由此本文 认为以 12 μm 作为黄土饱水带可渗透最小等效孔隙直 径是比较合理的。

## 4 黄土包气带水分运移分带

受地质、气候等因素的共同作用,黄土塬区黄土 地层由上至下依次为疏松、孔隙裂隙发育的马兰黄土 和离石黄土上部,较为致密、孔隙不甚发育的离石黄 土下部和午城黄土。黄土包气带土体含水率一般维 持在 20% 以上,这种垂向组合地层和较高含水率状态 使得黄土包气带有利于接收大气降水、灌溉水,在重 力和基质吸力作用下通过孔隙垂直入渗、缓慢运移补 给黄土潜水。此外,由于黄土包气带中古土壤序列的 存在以及基质吸力的差异导致黄土包气带垂向含水 率呈现波浪式变化特点,水分运移过程曲折复杂(图11)。

黄土包气带厚度大,结构复杂,不同深度的黄土 包气带有不同的功能作用和水分运移特点,存在一定 的分带性。20世纪80年代,中国地质科学院水文地 质环境地质研究所和陕西省地矿局等单位对黄土包 气带水的赋存状态、运移方式、补给机理作了深入探 讨并对黄土包气带进行了分带<sup>[5,8-9]</sup>。在借鉴前人认 识的基础上,根据黄土包气带水分赋存状态、运移特 征和影响因素,本文将其自上而下分为4个带(图12):

(1)气候影响带

气候影响带位于包气带最上部,由结构疏松的马 兰黄土组成,是各类孔隙最发育的地带,同时受季节 性冻融、干湿交替等作用普遍发育小型风化节理,渗 透性和吸水性强。该带受气候影响明显,降水时接收 雨水并快速下渗,黄土含水率迅速增大,地势低洼地 区形成地表积水时,更利于下渗;雨后该带黄土含水 率迅速降低,部分蒸发返回大气或被植物吸收;暴雨、 连阴雨又部分下渗至蒸发极限深度以下(约3.5 m<sup>[9]</sup>), 进入储存调节带,成为包气带中水分向下运移和补给 黄土潜水的主要来源。气候影响带为黄土包气带中 水分运移速度最快、与大气水分交替强烈的积极活 跃带。

除通过孔隙入渗外,该带的风化节理对洼地积水 和灌溉水的入渗也有积极作用,是一种优势通道,可 以产生优先流,增加地表水入渗量和入渗深度,同时 也有排气作用。

(2)储存调节带

储存调节带位于蒸发极限深度以下,底界一般位 于第一层古土壤之上的马兰黄土,厚度5~7m,渗透 性和储水能力强。下渗的水分富集储存于黄土孔隙 之中,土体含水率较高,一般达22%~30%,雨季接近 饱和状态。这部分水主要来自于暴雨、连阴雨,特别 是丰水年降水的入渗补给,如洛川塬2003年丰水年的 降水入渗深度达到5~7m<sup>[21]</sup>,董志塬2021年9—10月 的集中降水入渗深度也达到了7m。下渗至蒸发极限 深度以下的水分基本不再受气候影响,并受第一层古 土壤的阻隔长期滞留于该部位,成为包气带水分常年 运移和补给黄土潜水的重要来源。该水分连续、缓 慢、均匀地向下运移,实现了包气带水分的再分配,克 服了大气降水时间分布的不均性,在黄土包气带水分



图 10 董志塬黄土电镜图像与孔隙分布曲线

Fig. 10 Scanning electron microscope images and pore distribution curves of the Dongzhiyuan loess

9#驿马离石黄土

表1 董志塬黄土孔隙特性测试结果		
Table 1         Results of porosity properties of the Dongzhiyuan loess		
地层	平面总孔隙率/%	可渗透等效孔隙直径/µm
1#西峰马兰黄土	8.9	14.2
2#西峰马兰黄土	13.0	12.5
5#西峰离石黄土	6.1	12.8
7#驿马马兰黄土	7.3	12.3
8#驿马马兰黄土	6.0	12.2

5.2

12.8



图 11 黄土包气带含水率变化曲线

Fig. 11 Variations of moisture content in the loess aeration zone with depth

运移中起到重要调节作用。

(3)缓慢运移带

缓慢运移带厚度为数米至数十米,变化较大,是 黄土包气带水分运移的重要环节。该带黄土含水率 较稳定,变化甚微,含水率虽未达到饱和,但保持在田 间持水量(20%~23%)<sup>[3,5,8]</sup>上下,在重力和基质吸力 等作用下<sup>[33-35]</sup>,以薄膜水、重力水的形式沿着土粒表 面继续向下均匀运移,运移速度非常缓慢。

李春明等<sup>[8]</sup> 通过氢同位素测试认为, 渭北黄土层 中黄土潜水的补给时间一般不少于 10 a。张之淦等<sup>[35]</sup> 用氢同位素测得黄土包气带水分运移速度为 0.273 m/a。 按照董志塬 60 mm/a 的入渗量, 即塬面单位面积的入 渗量为 0.06 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·a)。假设其均匀分配在一年 365 d 内,缓慢运移带内单位面积的渗流量为 0.000 17 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),



图 12 黄土包气带分带图 Fig. 12 Zoning map of the loess aeration zone

即 0.17 L/(m<sup>2</sup>·d)(相当于人体输液速度 4 mL/min 的 3%)。按照包气带有水运移的孔隙率为 7.5%(可运移 孔隙的一半)计算,黄土包气带水分的实际运移速度 为 2.3 mm/d,即 0.83 m/a。对于 20~40 m 厚的黄土包 气带来说,水分要在其中最少经历 30~50 a 的时间才 能补给下部黄土潜水。可见,黄土包气带水分运移非 常微弱和缓慢,这与董志塬黄土潜水<sup>14</sup>C 年龄在 1~20 ka 的对应性较高<sup>[36]</sup>,也与黄土台塬大面积、高强度 的农业灌溉 3~6 a 后引起地下水水位上升的情况总 体相符<sup>[8,17]</sup>。

### (4)毛细接收带

毛细接收带位于潜水位以上,本带一般厚3.5~ 4.0 m,含水率变化很小,处于毛细力与重力作用的动 平衡状态,主要在毛细力的作用下接收上部缓慢运移 带的水分,连续稳定地转化为重力水并补给饱和带黄 土潜水,使黄土潜水的动态变化较为均匀,在黄土塬、 台塬区形成数量可观的黄土潜水资源,为城镇和农业 提供部分宝贵水资源。

由上可知,除上部气候影响带受气候、灌溉等人 为活动影响含水情况变化较为剧烈外,下部3带基本 处于稳定的含水动平衡状态。总之,黄土包气带水分 运移是由地质、气候等因素共同作用形成的一种特殊 的动平衡式水分运移。

### 5 结论

(1)黄土塬、黄土台塬区黄土层赋存有较丰富的 黄土潜水,大气降水垂直入渗是其主要补给来源,孔 隙是黄土潜水主要赋存和运移的空间和通道,重力水 赋存和运移的最小等效孔径约为12 μm。

(2)黄土塬、黄土台塬区大气降水主要通过黄土 包气带中的孔隙以薄膜水、重力水的形式沿着包气带 黄土的土粒表面向下运移,水分运移过程连续均匀且 非常缓慢。

(3) 黄土地层由上至下由疏松、孔隙裂隙发育的 马兰黄土和上部离石黄土渐变为较致密、孔隙不甚发 育的下部离石黄土和午城黄土,此种黄土包气带结构 有利于大气降水缓慢垂直入渗补给。

(4)根据水分赋存状态、运移特征、影响因素和作 用功能,黄土包气带可划分为气候影响带、储存调节 带、缓慢运移带和毛细接收带4个带。除上部气候影 响带受气候、灌溉等人为活动影响水分含量变化较为 剧烈外,下部3带基本处于稳定的动平衡状态。

### 参考文献(References):

- [1] 张宗祜,姚足金,王开申.中国黄土的主要工程地质问题[J].地质学报,1973,47(2):255-269.[ZHANG Zonghu, YAO Zujin, WANG Kaishen. Main engineering geological problems of loess in China[J]. Acta Geological Sinica, 1973,47(2):255-269. (in Chinese)]
- [2] 黄河中游地区黄土水文地质研究小组.黄河中游地区黄土水文地质问题[J].地质学报,1978,52(2):106-114.
  [Research Group of the Hydrogeology of Loess in the Middle Reaches of the Yellow River. On the hydrogeology of loess in the middle reaches of the Yellow River[J]. Acta Geologica Sinica, 1978, 52(2):106-114. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张治平.黄土区几个水文地质问题[J].陕西地质, 1985, 3(1):1-10. [ZHANG Zhiping. Some hydrogeologic problems in loess land[J]. Geology of Shaanxi, 1985, 3(1):1-10. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王德潜.黄土含水介质特征与地下水类型[J].陕西地质, 1985, 3(1):11-20. [WANG Deqian. The characteristics of loessial aqueous medium and the types of groundwater [J]. Geology of Shaanxi, 1985, 3(1):11-20. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王德潜. 洛川黄土潜水补给特征[J]. 水文地质工程地质, 1982, 9(5):1-8. [WANG Deqian. Characteristics of phreatic recharge of Luochuan loess[J]. Hydrogeology &

Engineering Geology, 1982, 9(5): 1 - 8. (in Chinese)

- [6] 阎太白,王德潜.洛川塬黄土潜水的补给机制及黄土 含水特征[J].地质论评,1983,29(5):418-427.[YAN Taibai, WANG Deqian. The recharge mechanism of unconfined groundwater in the loess of the Luochuan Yuan and its water-bearing characteristics[J]. Geological Review, 1983, 29(5):418-427. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王景明, 倪玉兰, 孙建中. 黄土构造节理研究及其应用[J]. 工程地质学报, 1994, 2(4): 31-42. [WANG Jingming, NI Yulan, SUN Jianzhong. A study on structural joints in loess and its practical applications[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(4): 31-42. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李春明,田润水. 渭北黄土含水介质的结构及黄土潜水赋存特征的初步研究[J]. 第四纪研究, 1986, 6(1): 68 - 71. [LI Chunming, TIAN Runshui. Preliminary study on the structure of water-bearing medium in Weibei loess and the characteristics of groundwater occurrence in loess[J]. Quaternary Sciences, 1986, 6(1): 68 - 71. (in Chinese)]
- [9] 施德鸿, 贾永瑞, 左秀法. 试论洛川黄土塬区包气带水分的赋存与运移[J]. 水文地质工程地质, 1983, 10(3): 6-13. [SHI Dehong, JIA Yongrui, ZUO Xiufa. Occurrence and migration of water in vascular zone in Luochuan loess tableland[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1983, 10(3): 6-13. (in Chinese)]
- [10] 蔺如生. 渭北黄土微结构、孔隙及导水性的分析[J]. 陕西水利, 1990(2): 43 47. [LIN Rusheng. Analysis of microstructure, porosity and water conductivity of Weibei loess[J]. Shaanxi Water Resources, 1990(2): 43 47. (in Chinese)]
- [11] 李云峰. 黄土渗透性与空隙性关系的研究[M]. 北京:
   地质出版社, 1994. [LI Yunfeng. Study on the relationship between permeability and porosity of loess[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese)]
- [12] 张建丰,林性粹,王文焰.黄土的大孔隙特征和大孔 隙流研究[J].水土保持学报,2003,17(4):168-171.
  [ZHANG Jianfeng, LIN Xingcui, WANG Wenyan. Characteristics of macro-pore and macro-pore flow in loess soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(4): 168 - 171. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 赵宽耀,许强,刘方洲,等.黄土中优势通道渗流特征 研究[J].岩土工程学报,2020,42(5):941-950.[ZHAO Kuanyao, XU Qiang, LIU Fangzhou, et al. Seepage

characteristics of preferential flow in loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 941 – 950. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 李鑫. 基于CT的黄土微细观空隙结构及优先流特性研究[D]. 西安:长安大学, 2020. [LI Xin. Research on micro and meso void structure and preferential flow characteristics of loess based on CT[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王雨山,潘建永.基于包气带剖面研究黄土地下水补给[J].地质论评, 2019, 65(增刊1):15-16. [WANG Yushan, PAN Jianyong. The study on groundwater recharge using soil profile in the Loess Plateau[J]. Geological Review, 2019, 65(Sup 1):15-16. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李喜安,彭建兵,陈志新,等.黄土地层地表径流下潜 模式与地质灾害[J].工程地质学报,2007,15(4):495-499.
  [LI Xi'an, PENG Jianbing, CHEN Zhixin, et al. On the infiltration modes of surface runoff in the loess layer and geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 495 - 499. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴玮江,王念秦.甘肃滑坡灾害[M].兰州:兰州大学 出版社,2006. [WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide hazards in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese)]
- [18] 王岩,刘若琼.论董志塬地下水资源及其可持续利用
  [J].水资源保护,2005,21(1):64-66. [WANG Yan, LIU Ruoqiong. Groundwater resources in Dongzhiyuan and its sustainable utilization[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(1):64-66. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 魏玉涛, 侯燕军, 李彬. 董志塬黄土潜水资源量变化 分析[J]. 甘肃科技, 2009, 25(24): 31-33. [WEI Yutao, HOU Yanjun, LI Bin. Analysis of shallow water resources variation of loess in Dongzhiyuan[J]. Gansu Science and Technology, 2009, 25(24): 31-33. (in Chinese)]
- [20] 邢天佑,李卓,刘平乐,等.甘肃西峰地区"1988·7·23"特大暴雨灾害与水保措施调查评价[J].水土保持通报,1991,11(3):40-47. [XING Tianyou, LI Zhuo, LIU Pingle, et al. Survey and evaluation of disaster caused by heavy rainstorm occured on July 23, 1988 and water and soil conservation measures in Xifeng area, Gansu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(3):40 47. (in Chinese with English abstract)]

[21] 陈宝群,赵景波,李艳花.特大丰水年洛川人工林地

土壤水分特征研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(4): 532-537. [CHEN Baoqun, ZHAO Jingbo, LI Yanhua. Research of soil water character below artificial forest of the heaviest rainfall year in Luochuan area of Yan'an[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(4): 532 - 537. (in Chinese with English abstract)]

- [22] 周有禄,武小鹏,房建宏,等.大厚度黄土湿陷特性现场及室内试验对比研究[J].铁道建筑,2018,58(1):114-117.[ZHOUYoulu,WUXiaopeng,FANG Jianhong, et al. Comparative study on field and laboratory tests for collapsibility characteristics of large thickness loess[J]. Railway Engineering, 2018, 58(1):114-117. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张晓宇.银西高铁软塑黄土隧道地表降水试验研究
  [J].现代隧道技术,2019,56(3):154-160.[ZHANG Xiaoyu. Experimental study on ground dewatering of the soft plastic loess tunnel on the Yinchuan-Xi'an railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(3):154-160. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈天明.董志塬富水黄土隧道地表降水开挖与隧底 软基加固技术研究——以银西高铁驿马一号隧道为 例[J]. 隧道建设, 2021, 41(6): 1015 - 1023. [CHEN Tianming. Surface dewatering excavation and soft foundation reinforcement technology for water-rich loess tunnel in Dongzhi tableland: A case study of Yima No. 1 tunnel on Yinchuan-Xi'an high-speed railway[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 1015 - 1023. (in Chinese)]
- [25] 彭建兵,王启耀,门玉明.黄土高原滑坡灾害[M].北京:科学出版社,2019. [PENG Jianbing, WANG Qiyao, MEN Yuming. Landslide disaster in loess plateau[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 孙建中.黄土学(上篇)[M].中国香港:香港考古学会 出版,2011. [SUN Jianzhong. Loessology[M]. Hongkong, China: Hongkong Archaeological Society, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王永焱,林在贯.中国黄土的结构特征及物理力学性质[M].北京:科学出版社,1990. [WANG Yongyan, LIN Zaiguan. Structural characteristics and physical and mechanical properties of Chinese loess[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)]
- [28] 高国瑞.中国黄土的微结构[J].科学通报, 1980, 25(20):
   945 948. [GAO Guorui. Microstructure of loess in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(20): 945 -948. (in Chinese)]

- [29] 雷祥义.西安附近黄土孔隙特征[J].水文地质工程地 质,1984,11(4):34-37.[LEIXiangyi.Pore characteristics of Huangshi near Xi'an[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1984, 11(4): 34-37. (in Chinese)]
- [30] 李林翠,李喜安,洪勃,等.不同埋深马兰黄土孔隙结构试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(2):493 503. [LI Lincui, LI Xi'an, HONG Bo, et al. Experiment on pore structures of Malan loess at different buried depth[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2):493 503. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 李云峰. 洛川黄土地层渗透性与孔隙性的关系[J]. 地 球科学与环境学报, 1991, 13(2): 60-64. [LI Yunfeng. Relationship between the permeability and the porosity of Luochuan's loess layer[J]. Journal of Earth Science and Environmental, 1991, 13(2): 60 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 赵东.黄土高原高速铁路隧道工程地质特点与地球 物理探测[D].长春:吉林大学,2019.[ZHAO Dong. Engineering geological characteristics of high-speed railway tunnels in the Loess Plateau and geophysical exploration[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese with English abstract)]

- [33] HILLEL D. Soil and water: Physical principles and processes [M]. New York: Academic Press, 1971.
- [34] MCQUEEN I S, MILLER R F. Approximating soil moisture characteristics from limited data: empirical evidence and tentative model[J]. Water Resources Research, 1974, 10(3): 521 – 527.
- [35] 张之淦,刘芳珍,张洪平,等.应用环境氚研究黄土包 气带水分运移及入渗补给量[J].水文地质工程地质, 1990, 17(3): 5 - 7. [ZHANG Zhigan, LIU Fangzhen, ZHANG Hongping, et al. Study of soil water movement and recharge rate of rainfall infiltration in aeration zone of loess by measuring natural tritium[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1990, 17(3): 5 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 凌新颖,马金珠,陈沛源,等. 陇东黄土高原董志塬区地下水水化学特征与<sup>14</sup>C年龄[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 24-32. [LING Xinying, MA Jinzhu, CHEN Peiyuan, et al. Hydrogeochemical characteristics and radiocarbon dating of groundwater in the Dongzhi Tableland of Longdong Loess Plateau[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(1): 24-32. (in Chinese with English abstract)]

编辑:张若琳