

王力, 吕相融, 吉珍霞, 邵明安. 降水能否穿透厚层黄土深剖面补给地下水—机制冲突与证据评估[J]. 土壤学报, 2026,

WANG Li, LÜ Xiangrong, JI Zhenxia, SHAO Mingan. Can Precipitation Penetrate Thick Loess Profiles to Recharge Groundwater? — Mechanism Conflicts and Evidence Evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

# 降水能否穿透厚层黄土深剖面补给地下水—机制冲突与证据评估\*

王力<sup>1,2,3</sup>, 吕相融<sup>1,3</sup>, 吉珍霞<sup>1,2,3</sup>, 邵明安<sup>4,1,2†</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 黄土高原发育了世界上最厚的风成黄土沉积, 形成了深厚的包气带结构, 使“降水能否穿透厚层黄土补给地下水”成为长期争议的核心科学问题。本文在系统梳理区域水文地质背景的基础上, 综合评述了“降水入渗能够穿透厚层黄土剖面补给地下水”及其反面观点的核心内涵和证据。前者认为, 在活塞流与优先流共同作用下, 降水可通过缓慢推进或沿优势通道快速下渗, 实现对地下水的长期或事件性补给; 后者则基于土壤干层、水分亏缺、黄土-古土壤互层结构及非饱和裂隙阻水效应等证据, 指出降水入渗深度有限, 主要参与浅层水循环, 难以贯通深厚包气带, 并提出深层地下水可能为古气候条件下形成的“古地下水”。进一步分析表明, 两种观点的差异主要源于研究尺度、观测方法及地貌条件的不同: 小尺度或事件尺度研究可揭示优先流等快速过程, 而区域尺度与长期观测则更反映缓慢或受限的入渗特征。此外, 不同地貌单元(塬面、坡面与沟道)之间显著的水文条件差异, 使地下水补给呈现强烈的空间非均质性。基于证据整合, 本研究认为厚层黄土区地下水补给并非单一过程, 补给机制具有明显的复杂性和多样性; 降水通过面状入渗直接穿透深厚包气带形成区域性地下水补给的能力可能相对有限。未来需加强黄土深层包气带长期观测、多示踪技术联合应用及多尺度综合分析, 以进一步厘清降水入渗与地下水补给之间的耦合关系。

**关键词:** 厚层黄土; 地下水补给; 包气带; 活塞流; 优先流; 土壤干层

中图分类号: P641.11 文献标志码: A

## Can Precipitation Penetrate Thick Loess Profiles to Recharge Groundwater? — Mechanism Conflicts and Evidence Evaluation

WANG Li<sup>1,2,3</sup>, LÜ Xiangrong<sup>1,3</sup>, JI Zhenxia<sup>1,2,3</sup>, SHAO Ming'an<sup>4,1,2†</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The Loess Plateau hosts the thickest aeolian loess deposits in the world, forming an exceptionally deep vadose zone. Under this unique geological setting, whether precipitation can penetrate thick loess profiles to recharge groundwater has long been a central scientific question in hydrogeology. Based on a systematic review of the regional hydrogeological background, this study synthesizes and evaluates two contrasting perspectives and their supporting evidence. One perspective suggests that, under the combined influence of piston flow and preferential flow, precipitation can migrate downward either gradually or rapidly through preferential pathways, thereby contributing to long-term or event-based groundwater recharge. The opposing view, drawing on evidence from dried soil layers, soil water deficits, loess-paleosol stratification, and the water-blocking effect

\* 国家自然科学基金项目(42377318, U24A20629)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42377318, U24A20629)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 王力(1973—), 男, 山西临县人, 博士, 研究员, 主要研究领域为土壤学与生态水文学。 E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2026-04-03; 收到修改稿日期: 2026-08-03; 网络首发日期(www.cnki.net):

of unsaturated fractures, argues that infiltration depth is limited, with most precipitation participating only in shallow soil water cycling and failing to penetrate the thick vadose zone; deep groundwater may instead largely consist of “paleo-groundwater” formed under past climatic conditions. Further analysis indicates that discrepancies between these views primarily arise from differences in research scale, observational methods, and geomorphic settings. Small-scale or event-based studies tend to capture rapid processes such as preferential flow, whereas regional-scale and long-term observations more often reflect slow or restricted infiltration. In addition, pronounced hydrological differences among geomorphic units (tablelands, slopes, and gullies) lead to strong spatial heterogeneity in groundwater recharge. Integrating available evidence, this study concludes that groundwater recharge in thick loess regions is not governed by a single mechanism but is instead a complex and heterogeneous process. The capacity of precipitation to directly penetrate the deep vadose zone via diffuse infiltration and form regional groundwater recharge is likely limited. Future research should emphasize long-term monitoring of deep vadose zones, the integrated use of multiple tracers, and multi-scale analyses to better constrain the coupling between precipitation infiltration and groundwater recharge.

**Key words:** Thick loess; Groundwater recharge; Vadose zone; Piston flow; Preferential flow; Dried soil layer

黄土高原是世界上分布最广、厚度最大的风成黄土沉积区之一，典型地区黄土厚度可达数十至数百米，形成了全球罕见的深厚包气带结构<sup>[1-2]</sup>。在这一特殊地质背景下，地下水是区域重要的水资源，对保障区域生态稳定和推动社会经济发展具有不可替代的作用<sup>[3]</sup>。然而，由于厚层黄土长期处于非饱和状态，且地下水埋深普遍较大，其地下水补给机制一直是黄土区水文地质研究中的核心科学问题。

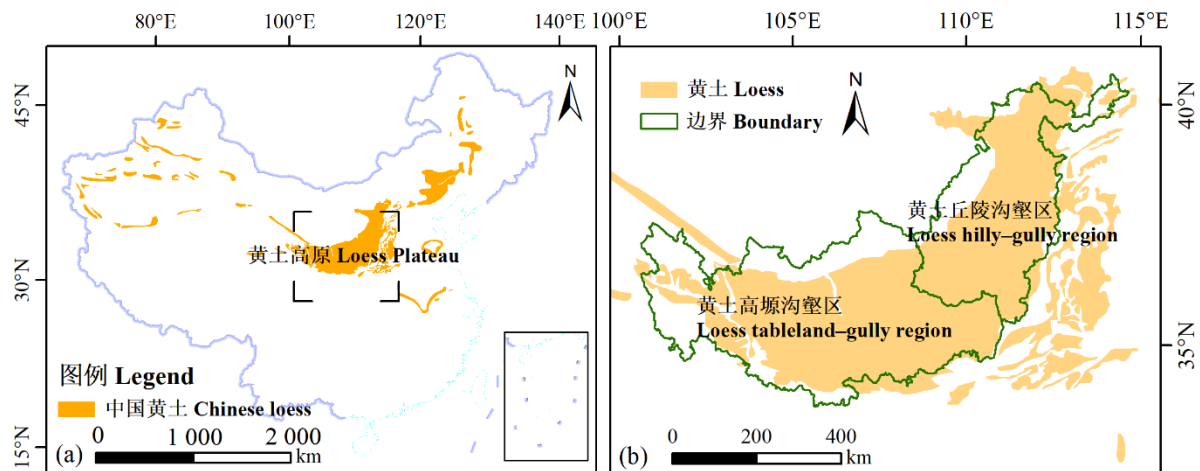
传统水文地质理论认为，大气降水通过土壤入渗和包气带渗透逐渐向下迁移，最终形成地下水补给过程。然而，在厚层黄土环境中，这一过程是否能够持续推进并贯通深层包气带，一直存在较大争议。一方面，黄土具有较高的孔隙度和发育良好的垂直裂隙结构，部分研究认为降水通过基质渗流或优先流向深层迁移，从而在一定条件下实现地下水补给<sup>[4-5]</sup>。另一方面，也有大量观测和研究表明，黄土区降水入渗深度有限，水分在浅层土壤中即被蒸散消耗或被土壤干层阻隔，难以形成持续而有效的深层补给过程<sup>[6]</sup>。在这种情况下，深层地下水可能主要来源于过去湿润气候阶段形成的“古地下水”，而现代降水对其补给作用十分微弱<sup>[7]</sup>。近年来，随着稳定同位素、环境示踪剂以及深层土壤水监测技术的发展，关于厚层黄土区地下水补给机制的研究不断增多，但争议仍旧存在。这些分歧不仅反映了研究方法与尺度的差异，也表明厚层黄土区地下水补给过程具有显著的空间异质性和复杂性。

因此，系统梳理和比较不同研究观点及其证据基础，对于深化认识厚层黄土区地下水补给机制具有重要意义。本文在总结黄土区包气带水文地质背景的基础上，重点综述关于“降水能否穿透厚层黄土补给地下水”的两种主要观点，系统分析其理论依据与观测证据，并在此基础上讨论两种观点产生分歧的可能原因，进而提出对厚层黄土区地下水补给机制的综合认识及未来研究方向，以期深入理解黄土高原深层水文循环过程提供新的思考框架。

## 1 厚层黄土包气带的水文地质背景

黄土高原广泛发育厚层第四纪风成黄土沉积，是全球最典型的厚层风成沉积区之一。连续沉积区的黄土厚度通常可达数十至数百米<sup>[8]</sup>，其中兰州西津村黄土厚度达到 409.9 m，为世界最厚的黄土地层<sup>[9]</sup>，从而形成了世界上少见的深厚包气带系统，其主体集中于黄土丘陵沟壑区和黄土高塬沟壑区（图 1）。该区域以深厚黄土堆积、强烈侵蚀切割和显著的垂向非均质结构为基本特征，是中国水土流失最为严重、地貌演化最为活跃的区域之一<sup>[1]</sup>。典型第四纪黄土序列自上而下包括马兰黄土、离石黄土和午城黄土等多个地层单元，并与多期古土壤层构成明显的黄土-古土壤旋回结构<sup>[1, 10-11]</sup>。这

种由长期沉积与古气候演化共同形成的层状结构,使得黄土剖面在物理性质和水力特征上表现出明显的垂向非均质性,对水分运移过程产生重要影响。



注: (a) 黄土在中国的分布 (该图基于自然资源部标准地图服务下载的审图号为 GS(2023)2726 号的标准地图制作,底图无修改); (b) 黄土在黄土高原丘陵沟壑区和高塬沟壑区的分布。Note: (a) spatial distribution of loess across China (This map is based on the standard map with review number GS (2023)2726, and downloaded from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. The base map has not been modified.); (b) distribution of loess within the loess hilly-gully region and the loess tableland-gully region of the Loess Plateau.

图 1 中国黄土分布图 (以彩图发表)

Fig. 1 Distribution of loess in China

从土壤结构特征来看,黄土具有高孔隙度、低含水率以及较为发育的垂直节理和大孔隙结构<sup>[12]</sup>。原生黄土通常呈疏松的支架式结构,其孔隙类型包括粒间孔隙、虫孔、根孔以及构造裂隙等,这些结构为水分入渗提供了潜在通道<sup>[13]</sup>。同时,在长期风化和成土作用的影响下,古土壤层往往表现出较高的黏粒含量和较低的渗透性,因而在一定程度上对垂向水分迁移形成阻滞或滞水作用<sup>[14]</sup>。此外,黄土区普遍发育的垂直裂隙系统在降雨过程中可能形成优势入渗通道,但在非饱和条件下也可能受到气体阻力和毛管压力差的限制<sup>[15]</sup>,从而表现出复杂的水力行为。

在水文环境方面,黄土高原气候总体呈半干旱至半湿润过渡特征,年降水量一般为 300~600 mm,降水季节性强且多以暴雨形式出现。与此同时,区域蒸散强度较高,使得大部分降水在浅层土壤中被蒸散消耗,形成明显的水分亏缺条件<sup>[6,16]</sup>。在植被恢复和长期蒸散作用影响下,许多地区的深层土壤形成了厚度可达数米至十余米的土壤干层,在一定程度上改变了包气带水分运移路径,并可能对降水向深层渗透产生显著限制<sup>[17]</sup>。

此外,厚层黄土区地下水埋深通常较大,塬区地下水位常在几十米甚至更深的位置<sup>[18-19]</sup>,这意味着降水若要形成有效的地下水补给,必须穿越一个极为深厚的非饱和带。在这一过程中,水分迁移不仅受到土壤结构和水力性质的控制,还受到降水特征、蒸散消耗以及地貌条件等多种因素的共同影响<sup>[20]</sup>。因此,厚层黄土包气带既可能为水分缓慢下渗提供长期储存空间,也可能由于水分亏缺和结构阻滞而限制深层入渗。这种复杂的水文地质背景正是黄土区地下水补给机制长期存在争议的重要原因。

## 2 观点一: 降水入渗能够穿透厚层黄土剖面补给地下水

部分研究认为,在特定水文条件和结构环境下,大气降水可以穿透厚层黄土包气带并形成地下水补给。这一认识主要基于黄土较高的孔隙度及发育的裂隙结构,也得到了多种观测与示踪研究的

支持。基于稳定同位素示踪、水化学分析及数值模拟等手段的研究指出,厚层黄土中水分运移主要受两类机制控制,即活塞流(基质流)与优先流<sup>[4, 21-22]</sup>。这两种传输模式在时间与空间上并存且相互作用,共同构成了黄土区降水入渗的基本水文过程框架。在这一框架下,优先流通过裂隙、根孔等优势通道,可在强降雨条件下实现快速下渗,从而为水分向深层迁移提供潜在路径;而活塞流则以缓慢推进的方式主导基质中的长期水分运移过程,并在一定程度上参与深层包气带乃至地下水系统的补给过程。

## 2.1 活塞流:缓慢而持续的深层补给机制

在相对均质的黄土介质中,水分主要受重力势与基质势控制,沿垂直方向缓慢下移,其湿润锋面以活塞式均匀推进,并逐步驱替原有土壤水,这一过程即为活塞流<sup>[21, 23]</sup>。在长期、低强度降水条件下,活塞流构成黄土区土壤水分迁移与储存的主导机制。基于水分运移的垂向差异,厚层黄土包气带通常可划分为活动带与稳定带,两者的分界面一般位于地下约 7 m 处<sup>[5]</sup>。其中,活动带内虽可能偶发局部、短暂的优先流,但整体上水分运移仍以活塞流为主;而在稳定带中,水分传输则几乎完全由活塞流控制<sup>[5]</sup>。在此基础上,降水通过活塞流逐步入渗并湿润包气带剖面,使水分在土体中不断积累与滞留,并在较长时间尺度上缓慢向下补给地下水,从而维持地下水系统的相对稳定与持续补给<sup>[22, 24]</sup>。相关研究进一步表明,活塞流在黄土高原广泛分布,占地下水总补给量的 30%~89%;相比之下,优先流主要局限于塬面中部或低洼地带等特定区域,且其作用随地下水埋深增加而逐渐减弱,影响深度一般不超过约 40 m<sup>[25]</sup>。

与快速且不稳定的优先流不同,活塞流迁移速度慢、路径均匀,具有明显的时滞效应<sup>[26]</sup>。Huang 等<sup>[22]</sup>基于氯累积年龄和氡峰运移速率,推算出黄土土壤水的运移速率为  $0.2\sim 0.3\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,据此估算降水到达地下水面的时间约为 60~500 a。Huang 等<sup>[27]</sup>利用多种环境示踪剂( $\text{Cl}$ 、 $\text{NO}_3$ 、 $\text{Br}$ 、 $^2\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$  和  $^{14}\text{C}$ )对正宁塬包气带进行了研究,推算出降水通过活塞流从地表入渗到地下水位历时约为 160~400 a。西峰黄土塬的研究同样支持这一缓慢过程,该区降水入渗速率为  $0.12\sim 0.14\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,相应补给率为  $37\sim 41\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,约占年降水量的 6.8%~7.5%<sup>[28]</sup>。多项研究表明,自然条件下活塞流通过厚层深剖面入渗补给地下水的速率介于  $9\sim 100\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[22, 24, 29]</sup>。Wang 等<sup>[30-31]</sup>通过多同位素联合分析指出,现代降水以活塞流为主导入渗,区域包气带与潜水含水层整体处于水力平衡状态;潜水主要由本地降水补给,包气带入渗速率约为  $0.15\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,长期平均补给率约为  $85.4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。庞忠和等<sup>[32]</sup>在黄土高原及周边地区的研究表明,许多黄土潜水含水层中地下水年龄为数百至数千年,这与活塞流缓慢入渗、补给周期漫长的特征高度一致。

## 2.2 优先流:强降雨事件下的快速补给通道

水分及其携带的溶质绕过土壤基质,沿多孔介质中的优势通道快速迁移的过程称为优先流<sup>[23, 33]</sup>。与缓慢、均质的活塞流不同,优先流表现出强烈的空间异质性与短时效特征。从流体力学机制看,优先流是水分在非平衡状态下对势能梯度的快速响应,其发生与土壤结构及周围环境的异质性密切相关,广泛存在于各类土壤和景观中<sup>[34]</sup>。

黄土沉积过程中形成的垂直节理发育显著,极易形成裂隙、根孔、虫孔等连通性良好的大孔隙(不同于洞穴、陷穴、落水洞等更大尺度的通道),为优先流提供了高效通道<sup>[35]</sup>。强降雨事件可使土壤接近饱和状态,促进优先流的形成与发展<sup>[36-37]</sup>。黄土高原的降水呈明显的干湿梯度,半湿润区降雨频繁、土壤湿度高,优先流触发概率大;半干旱区优先流主要被强脉冲型暴雨驱动,表现出较强的空间分异性<sup>[38-39]</sup>,其比例介于 36%~90%之间,且主要受降水控制<sup>[29, 40]</sup>。在强降雨条件下,优先流比例显著升高,并具有明显的立地差异,例如在黄土高原中部的安塞纸坊沟小流域,降水强度为  $120\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的条件下,人工刺槐林地的优先流比例可达到 78.7%,而农田仅为 59.6%<sup>[39]</sup>。旱季时由于土壤干燥和降雨强度低,优先流基本不发生;雨季期间,在 2 m、3 m、5 m、7 m 深度的土层中,优先流占单次入渗补给量的比例分别可达 91.4%、87%、83.5%、77.3%,占全年总入渗补给量的 81.7%、80%、69.2%、64.5%,表明优先流主要集中于雨季发生,且随深度增加其贡献逐渐降低<sup>[41]</sup>。

黄土高原多样化的地形地貌格局塑造了具有高度空间异质性的土壤水分迁移路径,进而导致优

先流过程在时空上呈现显著差异<sup>[39, 42]</sup>。黄土塬区地势平坦、黄土厚度大、包气带发育完整, 尽管垂直节理发育, 但非饱和条件下深层水力梯度较小, 导致优先流难以持续贯通至深层, 地下水对降水的响应普遍滞后 2~6 个月<sup>[43]</sup>。相比之下, 丘陵沟壑区地形破碎、坡度大、裂隙网络发达, 特别是沟道中, 强降水事件易触发快速入渗并沿优势通道穿透包气带直达含水层, 形成事件尺度至月尺度的快速补给, 沟道内地下水对降水的滞后响应通常为 1~2 个月<sup>[40]</sup>。优先流虽然在时空分布上具有不均匀性, 但其补给速率显著高于活塞流, 成为黄土高原干旱气候背景下实现跨圈层水分快速输送的关键机制, 可视为维系区域地下水资源更新的重要“动脉”。

### 2.3 活塞流与优先流的耦合

在黄土深层包气带的水分运移过程中, 活塞流与优先流并非相互独立, 而是以协同、竞争与转化的复合方式共同作用。在强降水条件下, 优先流被激活, 沿裂隙、生物孔隙和结构性孔道形成快速下渗路径, 使降水突破表层水力限制并在短期内到达深层<sup>[44]</sup>。在此过程中, 优先流沿迁移路径不断向周围基质供水, 促进湿润锋横向与纵向扩张, 从而增强活塞流的连续推进<sup>[45-46]</sup>。同时, 基质的吸水、缓释与扩散作用会削弱优先流的能量并改变其运移方式, 使其随深度增加逐渐衰减、分散或向活塞流转化, 这种“快速路径-慢速基质”的互馈机制构成了厚层黄土深剖面地下水典型的复合补给结构<sup>[44]</sup>。

从短时间尺度观察, 优先流在单次强降水事件中可能表现活跃; 但从长时间尺度来看, 活塞流对地下水的累积补给量往往占据主导地位<sup>[29]</sup>。两种机制的主导性高度依赖降水特征: 低强度、长历时降水有利于土体逐渐湿润, 湿润锋以相对均匀的方式推进, 活塞流为主要补给路径; 而高强度、短历时降水易激发大孔隙通道, 使优先流成为深层补给的主要途径, 并显著增强地下水的快速响应<sup>[41, 47]</sup>。因此, 在黄土高原深厚非饱和带环境中, 地下水补给表现为优先流的“快速突破”与活塞流的“持续渗透”共同塑造的混合型过程。从这一观点出发, 现代降水被认为在一定程度上仍然参与了黄土区地下水系统的更新过程。

## 3 观点二: 降水入渗难以穿透厚层黄土深剖面补给地下水

与上述观点不同, 另一类研究认为, 在厚层黄土发育地区, 现代降水入渗难以穿透几十米乃至上百米的深厚包气带, 因而无法形成有效的地下水补给。这一观点主要基于对降水入渗深度、土壤干层发育、黄土-古土壤层序结构以及裂隙阻水作用等多方面证据的综合分析, 认为降水入渗过程在浅层土壤中即受到多种因素的限制, 从而难以持续推进至深层地下水系统。

### 3.1 水分亏缺与土壤干层阻隔效应

黄土高原年平均降水量约 433 mm (1960—2020 年)<sup>[48]</sup>, 而潜在蒸散量高达 1 400~2 000 mm; 干旱的气候条件、强烈的蒸散消耗以及深厚的黄土结构, 共同导致土壤长期处于水分亏缺状态, 致使半干旱区 3 m 土层之下形成土壤干层<sup>[6, 16, 49]</sup>。土壤干层的形成不仅仅是水分含量的降低, 更是水动力学性质的改变。干层含水率低、基质吸力大, 构成一个强烈的“水分汇”, 形成阻碍深层垂向补给的“水力屏障”<sup>[6]</sup>。该屏障既抑制活塞流的推进速度, 也可迅速吸收沿根道、裂隙等优势通道下渗的优先流<sup>[6, 50]</sup>。因此, 土壤干层在自然条件下不仅难以恢复, 反而会切断土壤水分向深部的运移路径。

土壤干层在黄土区广泛分布, 空间覆盖率可达 20%~50%, 平均厚度为 262 cm<sup>[51]</sup>; 长期观测表明, 年降水对土壤湿润锋的最大影响深度通常仅为 1~3 m<sup>[6, 52]</sup>, 即使在累计降水量较高的年份, 大于 5 m 土层的土壤含水率对降水的响应也很弱<sup>[53]</sup>。黄土高原厚层深剖面区地下水(潜水)埋深普遍为 50~100 m, 远超自然降水入渗深度与土壤干层位置, 导致降水几乎无法直接补给含水层<sup>[6, 50]</sup>。稳定同位素( $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ )和氯质量平衡研究为该“水力失连”现象提供了化学指纹证据。深层土壤水和地下水的同位素组成往往比降水更贫化, 这表明地下水并未接受现代降水的有效补给, 其水源可能

源于数千年乃至数万年前更加湿润气候条件下的古水<sup>[54-55]</sup>。由此，降水对地下水的补给在此类厚层黄土环境中可能处于极为微弱甚至停滞的状态。

3.2 降水入渗深度及区域差异

黄土高原近 40 年土壤水分监测数据表明，区域尺度降水入渗补给深度平均约为 1 m<sup>[56]</sup>。黄土丘陵沟壑区顾屯小流域深剖面土壤水分时空动态监测数据发现，土壤水分的季节性变化集中在 0~100 cm 土层，降水主要维持浅层（0~300 cm）土壤水循环<sup>[52]</sup>。多项实地观测研究进一步印证了黄土区降水入渗深度普遍较浅的特征。在强降水事件（24 小时降水量为 25~50 mm）中，虽然水量足以驱动活塞流突破 80~150 cm 土层阻力，但湿润锋一般难以穿透 200 cm 深度<sup>[57-58]</sup>。即使是 50 mm 以上的强降水事件，只有在多次连续降雨作用下，才可能对 300 cm 以下的土壤产生影响<sup>[59]</sup>。稳定同位素（ $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ ）研究结果同样显示，降水同位素信号在 100~300 cm 范围内快速衰减<sup>[60]</sup>，仅极少数强降水事件才可能将水分和同位素信号推进到 500~700 cm<sup>[55]</sup>。这些研究表明，绝大部分降水主要参与的是“降水-入渗-蒸发”主导的浅层水文小循环，而非包含地下水补给的深层水文大循环。

垂直节理发育的黄土虽能形成潜在的优先流通道，但在实际的水文过程中，这种“潜在通道”往往难以转化为有效的深层补给通道。李同录等<sup>[61]</sup>基于 Richards 垂向一维入渗方程（ $dvz/dz = -d\theta/dt$ ）<sup>[62]</sup>，提出黄土包气带可划分为湿润锋以上的活动带与湿润锋以下的稳定带，前者渗流过程受降水事件驱动，属于瞬态流；而后者由重力势与基质势共同控制，表现为相对稳定的渗流状态。该理论认为厚层黄土的主体位于稳定带，其中存在下渗速率恒定的活塞流，可穿透厚层黄土深剖面补给地下水。然而，这种活塞流模式更可能是一种理想化假设，仅在均质且厚度较小的马兰黄土（约 7~15 m）中具备形成条件。本团队在黄土丘陵沟壑区羊圈沟小流域的实地观测表明（图 2），即使在 2023 年雨季累计降水量达 420 mm（其中 9 月降水 115 mm）的情况下，土壤裂隙中仍难以形成持续下渗的优先流；部分裂隙虽在短期内承接到入渗水分，但这些水分很快被周围土体吸收，导致下渗过程中断，这一结果与李玉山<sup>[17]</sup>关于黄土裂隙渗流难以形成连续深层补给的结论一致。

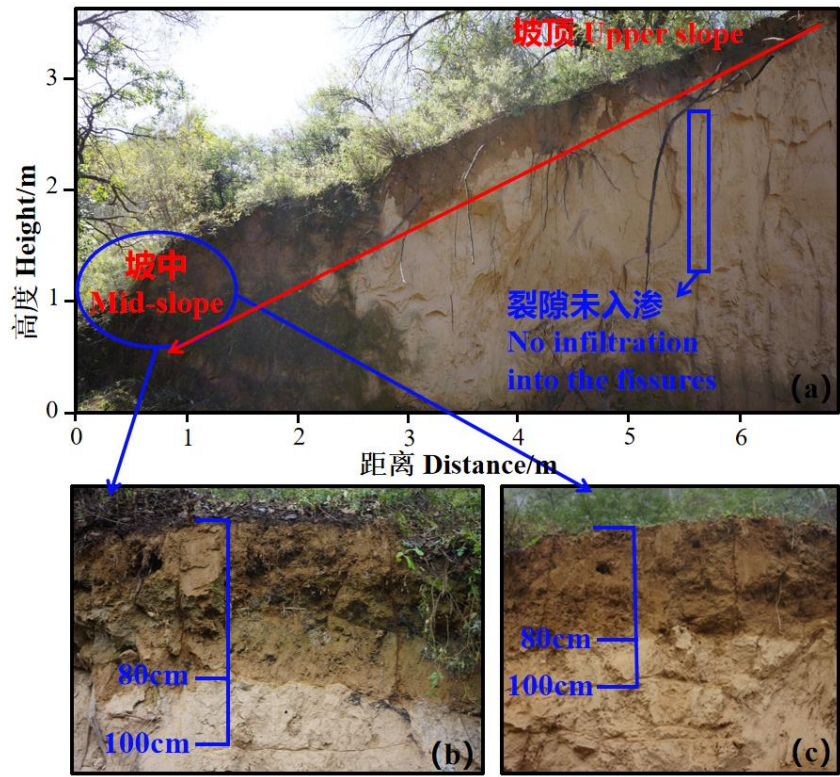


图 2 黄土高原丘陵沟壑区山体剖面水分入渗示意图（以彩图发表）

Fig. 2 Schematic diagram of water infiltration along a hillslope profile in the loess hilly-gully region of the Loess Plateau Li 等<sup>[63]</sup>对黄土高原刺槐根系分布的研究表明，作为优先流主要载体的植物根系孔隙，其密度

随深度呈指数级衰减，绝大多数大孔隙分布于地下 200 cm 以内。这会限制优先流在深层土壤中的发展，使得水分运移模式由大孔隙优先流转变为缓慢的“活塞流”<sup>[64]</sup>。黄土高原丘陵沟壑区的亮蓝染色示踪实验也证实，染色剂的优先流路径主要集中在 50~60 cm，随深度增加其连通性迅速减弱，侧向扩散作用相对增强，无法保持明显的纵向连通，从而未能形成贯穿整个包气带的稳定通道<sup>[65]</sup>。陈建生等<sup>[66]</sup>研究指出黄土剖面并未发现明显或完整的垂向入渗通道，从而对优先流在深层补给中的有效性提出质疑。乔江波等<sup>[67]</sup>在渭北台塬区至水蚀风蚀交错带等不同黄土地貌单元开展剖面土壤含水量调查，发现从地表至基岩界面的土壤含水量均远未达到饱和状态，表明降水入渗深度有限，难以穿透厚层黄土深剖面补给地下水。

3.3 厚层黄土的地层结构和岩性特征

厚层黄土剖面具有显著的垂向非均质性地层结构，自上而下可划分为三个主要地层单元(图 3)：马兰黄土 (Q<sub>3</sub>，厚度约 7~15 m，晚更新世)、离石黄土 (Q<sub>2</sub>，厚度约 70~110 m，中更新世) 和午城黄土 (Q<sub>1</sub>，厚度约 50~130 m，早更新世)。其间交替发育多达 34 组黄土层 (L)-古土壤层 (S) 序列，反映出第四纪以来干冷与暖湿气候的交替演化<sup>[1-2, 10, 68]</sup>。其中，黄土层多形成于干冷期的风尘堆积，粉砂颗粒占主导，渗透性相对较强<sup>[1, 69]</sup>；而古土壤层则发育于暖湿期的成壤过程，黏粒含量高 (20%~35%)，富含铁锰氧化物与胶膜物质，结构致密，渗透系数可低至 10<sup>-6</sup>~10<sup>-7</sup> cm·s<sup>-1</sup>，因而表现出明显的弱透水或不透水性<sup>[69]</sup>。这种黄土与古土壤互层的非均质结构使厚层黄土剖面内部的水力性质空间异质性显著，难以在整个剖面上形成下渗速率恒定的活塞流。

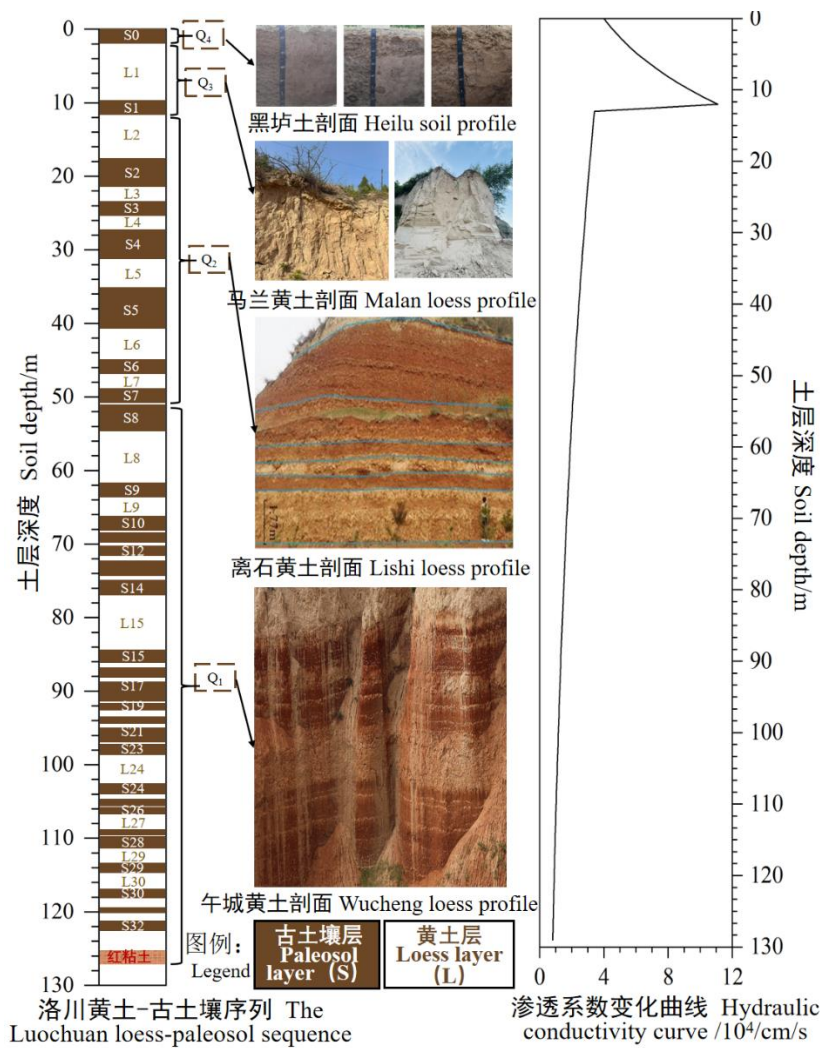


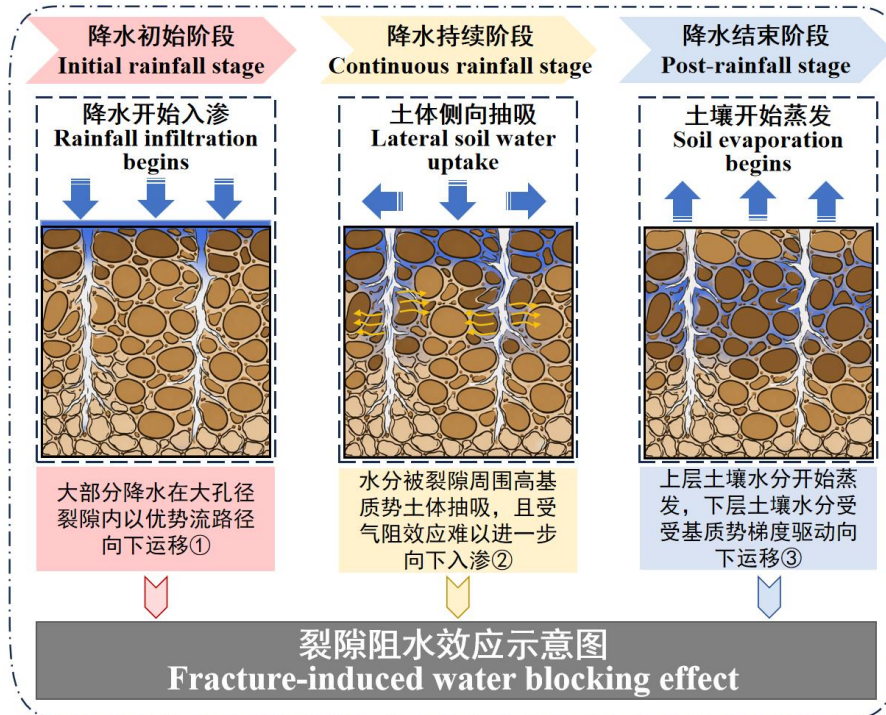
图 3 厚层黄土典型剖面结构图及渗透系数变化曲线（以彩图发表）

Fig. 3 Typical profile structure of thick loess and variation in hydraulic conductivity

一般而言, 活塞流的补给深度可能仅限于黄土剖面的马兰黄土层 ( $Q_3$ )。马兰黄土上部覆盖 0.5~2 m 厚的全新世黑垆土 ( $S_0$ ), 该层富含有机质与黏粒, 饱和导水率较低 ( $K_s \approx 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 表现为弱透水层<sup>[70]</sup>。但在连续或强降雨事件下, 湿润锋可穿透黑垆土层进入下伏马兰黄土。马兰黄土质地相对均一、疏松多孔, 孔隙率达 45%~55%, 垂向渗透系数介于  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 是降水入渗的主要通道<sup>[71-72]</sup>。然而, 当水分进一步下渗至离石黄土层 ( $Q_2$ ) 时, 其内部发育的古土壤层会显著阻滞水分下渗。入渗水在古土壤层上方聚集, 形成局部高含水带; 在极端降水或灌溉条件下, 湿润锋短暂加深, 入渗量增加, 古土壤层上部可形成暂时性的上层滞水<sup>[73-75]</sup>。以甘肃永靖县黑方台为例, 该区长期引黄漫灌发展设施农业, 下渗灌溉水在低渗透隔水层之上持续汇聚, 形成稳定的上层滞水, 诱发了频繁且严重的滑坡灾害<sup>[76-77]</sup>。这一现象表明, 入渗水在遭遇隔水结构后难以继续向深部传输, 而是以上层滞水形式在隔水层上方累积, 从而印证了厚层黄土剖面中水分入渗深度总体受限, 难以穿透整个包气带, 因而无法实现对深层地下水的有效补给<sup>[17, 66]</sup>。相反, 地下水补给更可能依赖于局部集中入渗过程, 如沟道集中入渗、洞穴/落水洞或人工扰动区 (如塌陷洼地、坝地及耕作区) 的局地渗透<sup>[24, 78-79]</sup>。这种非均质介质下的局部补给机制决定了黄土区地下水补给的空间不连续性 (带状分布、片状分布) 与时间滞后性。因此, 在开展厚层黄土区降水入渗研究与地下水补给模拟时, 应充分考虑地层结构、地貌类型、岩性特征及隔水层分布, 以避免高估降水入渗对深层地下水的补给潜力。

### 3.4 非饱和条件下的裂隙阻水作用

裂隙通常被认为是潜在的快速渗流通道。然而, 根据非饱和渗流理论, 在非饱和土体中, 裂隙不仅难以促进深层水分入渗, 反而表现为明显的“阻水”效应 (图 4)。原因在于较大孔径裂隙内的毛管压力远低于周围细颗粒基质, 降雨入渗后, 水分首先被高基质势的土壤强烈吸引, 导致裂隙水在短距离内迅速向周围土体侧向迁移; 与此同时, 裂隙内部因空气封闭、毛管不连续以及显著的气阻效应, 难以形成稳定连续的向下渗流通道<sup>[80-81]</sup>。



- ① During the initial stage of precipitation, water pours down with great speed along preferential flow paths, such as vertical joint, root pore, and cracks and wormholes.
- ② Water is drawn up by the soil matrix around the preferential flow paths, which has a high matrix potential, and is prevented from infiltrating further downwards by the air resistance effect.
- ③ Water in the upper soil layer begins to evaporate, whilst water in the lower soil layer is transported downwards, driven by the gradient in potential across the substrate.

图 4 土壤裂隙阻水效应示意图（以彩图发表）

Fig. 4 Schematic diagram of the water-blocking effect of soil fractures

在自然条件下，黄土深层包气带普遍处于非饱和状态，其体积含水量通常为 10%~30%<sup>[6, 17]</sup>。在此含水范围内，水分无法充满全部孔隙与裂隙空间，从而形成了以空气为主的充气裂隙网络。这些裂隙通常与大气连通，内部气体压力接近大气压（零压），而周围非饱和土体中的水分处于负压状态，两者之间存在显著的水势差。因此，裂隙中的水分通常在 20~50 cm 范围内即被周围不饱和土壤完全吸收<sup>[17, 82]</sup>。由于负压水不可能向零压裂隙中排出，因此这些充气裂隙实际上不具备导水能力，反而起到屏蔽水流的作用，成为“非导水”结构<sup>[15]</sup>。深层钻探与长期剖面监测结果均表明，裂隙深部未发现受降雨控制的湿润锋，表明在厚层黄土中，裂隙未充当深层补给的通道<sup>[52, 67]</sup>。室内入渗试验进一步证实了这一规律。在初始含水率较低（<10%）的非饱和条件下，裂隙入渗量仅占总入渗量的 5%~20%，超过 80% 的水分在裂隙入口附近被侧向吸收进入基质，而非沿裂隙向下延伸<sup>[83]</sup>。即使在裂隙贯通且开度较大的条件下，气体滞留仍会阻碍水流下渗，从而表现出“有裂隙而无优先流”的典型特征<sup>[83]</sup>。只有当裂隙基本饱和、土壤含水率接近田间持水量，且降雨强度持续超过土壤入渗能力时，裂隙才可能出现短暂的垂向快速渗流现象。然而，此类情形极为有限，通常发生在持续性强降水事件或人工灌溉过程中。因此，在非饱和条件下，即使黄土中发育有明显的垂直裂隙或大孔隙，也难以形成连通的水流网络，不仅无法增强整体渗透性，反而削弱了深层水分迁移的连通性。

综上所述，支持“降水难以穿透厚层黄土深剖面补给地下水”的研究普遍认为，在半干旱气候条件、深层土壤干层、非饱和裂隙阻水以及黄土-古土壤层序结构等多重因素共同作用下，大气降水主要参与浅层土壤水循环，而难以形成持续的深层补给过程。由此推断，黄土区深层地下水的形成可能更多与过去气候环境及长期地质演化过程有关，而现代降水对地下水系统的直接补给作用相对有限。

## 4 两种观点的证据评估与综合认识

综合已有研究可以发现，关于降水是否能够穿透厚层黄土并补给地下水的两种观点均具有一定的依据，但其结论往往依赖于不同的研究尺度、观测方法以及研究对象。因此，与其简单地将两种观点视为相互对立，更有必要从尺度效应、地貌条件及入渗过程等方面对相关证据进行综合评估，从而形成更加合理的认识框架。

首先，不同研究尺度可能是造成研究结论差异的重要原因。许多支持降水入渗能够形成深层补给的研究多基于小尺度实验或局部观测，例如染色实验、单次降雨入渗试验以及优先流示踪实验等。这些研究能够清晰地揭示裂隙、根孔等优势通道对水分迁移的促进作用，但其结果往往反映的是短时间尺度或局部范围内的入渗过程<sup>[84]</sup>。相比之下，一些基于长期土壤水分监测、同位素剖面分析以及地下水年龄测定的研究则更多关注区域尺度或多年尺度的水分运移特征，其结果通常表明降水入渗深度较为有限<sup>[56, 82]</sup>。因此，不同尺度研究所揭示的水分运移过程可能具有不同的主导机制，这在一定程度上解释了现有研究结论之间的差异。

其次，地貌条件的差异也可能对地下水补给过程产生重要影响。在黄土高原不同地貌单元中，降水入渗环境存在显著差异。例如，在塬面地区，地形相对平坦且植被蒸散较强，大部分降水在浅层土壤中即被消耗，深层补给相对较弱；在坡面地区，入渗水分不仅受到蒸散作用影响，还可能沿坡面形成侧向迁移，从而进一步减少向深层渗透的水量；而在沟道、洼地或坝地等径流汇集区域，由于地表水集中入渗，且黄土剖面厚度大幅降低，局部入渗通量明显增加，可能形成相对快速的地下水补给过程<sup>[51, 79]</sup>。因此，不同地貌单元之间的水文条件差异，可能导致地下水补给机制在空间上呈现明显的非均质性和集中性特征。需要特别指出的是，沟道不属于厚层黄土，由于沟谷的强烈切割破坏了原有厚层黄土与隔水层之间的连续互层结构，使沟坡剖面切穿多个隔水层；与完整的厚层

黄土相比,沟道及坝地的土壤剖面厚度大幅降低,原有黄土地层序列不再完整,从而为降水入渗与地下水系统之间的直接连通提供了更为有利的物理条件。

再次,从入渗机制的角度看,厚层黄土包气带中的水分运移很可能并非单一过程,而是多种机制共同作用的结果。活塞流能够在长期时间尺度上缓慢推动水分向下迁移,而优先流则可能在强降雨事件中形成快速入渗通道<sup>[44]</sup>。此外,黄土湿陷性广泛发育于塬边坡、沟谷坡面及径流汇集区,常形成洞穴、陷穴或落水洞,这些结构性通道不同于裂隙、根孔、虫孔等大孔隙(毫米至厘米级),其直径往往达到厘米至米级甚至更大,具有良好的贯通性和汇流能力,能够汇集地表径流并构建垂向优势渗流和管道流通道,使降水或径流绕过相对致密的土体结构,快速进入深部黄土体甚至含水层,从而实现对地下水系统的有效补给<sup>[85-86]</sup>。这类由洞穴介导的地下水补给过程,很可能是厚层黄土区深层潜水得以形成与维持的重要机制之一,但在以往研究中长期未得到充分关注,且在概念上常与由大孔隙主导的优先流过程相混淆。因而,在不同水文条件与空间尺度下,上述多种入渗和渗流过程可能以差异化方式叠加与协同,共同控制地下水补给的格局与强度。

基于上述分析,可以认为厚层黄土区地下水补给机制具有明显的复杂性和多样性。降水通过面状入渗直接穿透深厚包气带形成区域性地下水补给的能力可能相对有限,但在长期缓慢入渗、优先流事件以及局部集中入渗等多种过程的共同作用下,现代降水仍有可能在一定程度上参与地下水系统的更新。因此,两种观点在一定程度上反映了不同空间尺度和水文条件下的实际过程,其差异并不完全是相互排斥的,而更可能是对同一水文系统不同侧面的认识。总体而言,厚层黄土区地下水补给更可能表现为一种由多种过程共同控制的复合机制:在大尺度上,以缓慢的基质入渗和长期水分迁移为主;在局部尺度上,则可能受到优先流通道和集中入渗过程的显著影响。这一综合认识为理解黄土区地下水系统与现代水循环之间的关系提供了一个更加合理的解释框架。

## 5 未来研究方向

总体而言,在厚层黄土深厚包气带条件下,降水通过面状入渗直接补给地下水的的能力被显著高估,当前研究仍主要依赖局地观测或模型推断,缺乏跨尺度、长期连续监测的系统证据。因此,要进一步厘清降水入渗与地下水补给之间的关系,亟需在观测体系构建、多方法综合应用以及多尺度分析等方面开展更加系统和深入的研究,从而为准确认识厚层黄土区地下水补给机制提供可靠的科学依据。

首先,应加强深厚包气带水分运移的长期连续观测。目前大多数关于降水入渗深度的研究多基于短期观测或浅层土壤监测,而对几十米甚至上百米深度范围内水分变化的长期观测仍然十分有限。未来有必要在典型塬面和坡面建立深层包气带监测剖面,通过多层土壤水分传感器、张力计以及地下水位监测等手段,获取更长时间尺度的水分运移数据,从而更准确地评估降水入渗在深厚包气带中的迁移过程及其时间跨度。

其次,应综合利用多种环境示踪技术,以识别地下水来源及其补给历史。稳定同位素( $^2\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}$ )、氯离子、氡以及地下水年龄示踪(如 $^{14}\text{C}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^81\text{Kr}$ 等)在识别水体来源方面具有重要作用,但单一示踪方法往往存在解释上的不确定性。未来研究需要通过多示踪剂联合应用,并结合水文模型分析,对地下水补给来源及其更新速率进行更加可靠的约束,从而更好地区分现代降水补给与古地下水贡献之间的关系。

第三,应进一步深入研究黄土结构特征对水分运移的控制作用。黄土-古土壤层序结构、裂隙发育状况、大孔隙网络、洞穴/落水洞大通道等均可能显著影响水分在厚层黄土中的迁移路径和速度。未来可通过室内实验、野外示踪实验以及高分辨率结构观测等手段,系统分析不同结构单元对入渗过程的影响,从而更好地揭示优先流与基质流之间的相互作用机制。

第四,还需要从流域尺度综合评估不同地貌单元对地下水补给的贡献。现有研究多集中于单点

或小尺度观测,而地下水补给往往是多种水文过程在流域尺度上综合作用的结果。结合遥感数据、地貌分析以及分布式水文模型模拟,可以更加系统地评估塬面、坡面及沟道等不同地貌单元在地下水补给过程中的作用,从而提高对区域地下水循环过程的整体认识。

总体而言,未来研究应通过长期观测、示踪技术与多尺度分析方法的综合应用,逐步构建更加完善的厚层黄土区地下水补给研究框架。只有在多学科交叉和多尺度观测的基础上,才能更加准确地揭示厚层黄土包气带中水分运移及地下水补给的真实过程,为黄土高原水资源评价与生态环境管理提供更加可靠的科学依据。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu D S. Loess and the environment[M]. Beijing: Science Press, 1985. [刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [2] Deng C L, Hao Q Z, Guo Z T, et al. Quaternary integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(1): 330-352.[邓成龙, 郝青振, 郭正堂, 等. 中国第四纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(1): 330-352.]
- [3] Xiao J, Wang L Q, Chai N P, et al. Groundwater hydrochemistry, source identification and pollution assessment in intensive industrial areas, eastern Chinese Loess Plateau[J]. Environmental Pollution, 2021, 278: 116930.
- [4] Lu Y W. Study on typical hydrological characteristics of the vadose zone and spatiotemporal evolution of potential groundwater recharge in the Chinese Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2020. [陆彦玮. 黄土高原包气带典型水文特征与潜在地下水补给的时空演变研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.]
- [5] Wang C X. Response of slope groundwater to rainfall series and prediction of rainfall landslide stability[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023. [王晨兴. 斜坡地下水对降雨序列的响应及降雨滑坡稳定性预测[D]. 西安: 长安大学, 2023.]
- [6] Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region[J]. Acta Ecologica Sinica, 1983, 3(2): 91-101. [李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101.]
- [7] Pan F, Zhang Q H, He J H. Groundwater recharge environment and geochemistry evolution of the Quaternary aquifer in the Dunzhiyuan region, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2014(1): 9-18. [潘峰, 张清寰, 何建华. 甘肃董志塬地区第四系地下水补给环境与水化学特征演化[J]. 干旱区地理, 2014(1): 9-18.]
- [8] Zhu Y J, Jia X X, Shao M G. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China[J]. Surveys in Geophysics, 2018, 39(4): 715-727.
- [9] Bai F L. The thickest loess deposits in the world—A study of the xijincun loess section, Lanzhou[J]. Geological Review, 1987, 33(2): 188-191. [白凤龙. 世界最厚的黄土地层——兰州西津村黄土剖面研究[J]. 地质论评, 1987, 33(2): 188-191.]
- [10] Ding Z L, Liu D S. Progresses of Loess research in China (Part 1): Loess stratigraphy[J]. Quaternary Sciences, 1989, 9(1): 24-35. [丁仲礼, 刘东生. 中国黄土研究新进展(一): 黄土地层[J]. 第四纪研究, 1989, 9(1): 24-35.]
- [11] Zhu X M, Ren M E. Formation process of the Loess Plateau and a strategy of its management[J]. Soil and Water Conservation in China, 1992(2): 4-10. [朱显谟, 任美镔. 中国黄土高原的形成过程与整治对策[J]. 中国水土保持, 1992(2): 4-10.]
- [12] Liu D S, Wen Q Z, Zheng H H, et al. Relationship between material composition and structure of loess and soil and water conservation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1981, 1(1): 16-19. [刘东生, 文启忠, 郑洪汉, 等. 黄土的物质成分和结构与水土保持的关系[J]. 水土保持通报, 1981, 1(1): 16-19.]
- [13] Lu Q Z, Peng J B. Characteristics of structural planes of loess mass in Loess Plateau of China and its hazard effect[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(4): 446-450. [卢全中, 彭建兵. 黄土体结构面的发育特征及其灾害效应[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 446-450.]
- [14] Li L, Wang J D, Dong H Y, et al. Hysteretic collapse in loess-paleosol strata: Mechanisms and regulatory role of paleosol[J]. Catena, 2025, 259: 109380.
- [15] Xu Z Y, Zhao Y J, Chen J J. Research of fractural efficacy on mechanisms governing water flow in unsaturated loess[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 1993, 23(3): 326-329. [许兆义, 赵英杰, 陈家军. 包气带水流中黄土裂隙作用机制研究[J]. 长春地质学院学报, 1993, 23(3): 326-329.]

- [16] Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22. [邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22. ]
- [17] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427-432. [李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 427-432.]
- [18] Chen P Y, Ma X Y, Ma J Z, et al. Discrepancy and estimates of groundwater recharge under different land use types on the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 53: 101793.
- [19] Li H X, Han S B, Wu X, et al. Distribution, characteristics and influencing factors of fresh groundwater resources in the Loess Plateau, China[J]. *China Geology*, 2021, 4(3): 509-526.
- [20] Mei X M, Ma L, Zhu Q K, et al. The variability in soil water storage on the loess hillslopes in China and its estimation[J]. *Catena*, 2019, 172: 807-818.
- [21] Scanlon B R, Healy R W, Cook P G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 18-39.
- [22] Huang T M, Pang Z H, Edmunds W M. Soil profile evolution following land-use change: Implications for groundwater quantity and quality[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(8): 1238-1252.
- [23] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [24] Gates J B, Scanlon B R, Mu X M, et al. Impacts of soil conservation on groundwater recharge in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(4): 865-875.
- [25] Xiang W, Si B C, Biswas A, et al. Quantifying dual recharge mechanisms in deep unsaturated zone of Chinese Loess Plateau using stable isotopes[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 773-781.
- [26] Wang J W, Dan Y P, Cheng X L, et al. Estimated time of phreatic discharge in loess highland by analysis of “shape closeness” [J]. *Geology of Shaanxi*, 2010, 28(2): 72-75. [王佳武, 但永平, 程晓露, 等. 应用 “形状贴度” 分析法估算黄土塬区潜水补给时间[J]. *陕西地质*, 2010, 28(2): 72-75.]
- [27] Huang T M, Pang Z H, Liu J L, et al. Groundwater recharge mechanism in an integrated tableland of the Loess Plateau, northern China: Insights from environmental tracers[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(7): 2049-2065.
- [28] Huang T M, Ma B Q, Pang Z H, et al. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124532.
- [29] Li Z, Chen X, Liu W Z, et al. Determination of groundwater recharge mechanism in the deep loessial unsaturated zone by environmental tracers[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 827-835.
- [30] Wang W Z, Sun J N, Xia Y, et al. Identifying hydraulic connectivity among the vadose zone, unconfined and confined aquifers in the thick loess deposits using multiple tracers[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130339.
- [31] Wang W Z, Xia Y, Sun J N, et al. Uncertainties in physical and tracer methods in actual groundwater recharge estimation in the thick loess deposits of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 634: 131127.
- [32] Pang Z H, Huang T M, Yang S, et al. The potential of the unsaturated zone in groundwater recharge in arid and semiarid areas[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 51-61. [庞忠和, 黄天明, 杨硕, 等. 包气带在干旱半干旱地区地下水补给研究中的应用[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 51-61.]
- [33] Bouma J. Soil morphology and preferential flow along macropores[J]. *Agricultural Water Management*, 1981, 3(4): 235-250.
- [34] Lin H. Linking principles of soil formation and flow regimes[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1/2): 3-19.
- [35] Feng L, Lin H, Zhang M S, et al. Development and evolution of Loess vertical joints on the Chinese Loess Plateau at different spatiotemporal scales[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105372.
- [36] Clothier B E, Green S R, Deurer M. Preferential flow and transport in soil: Progress and prognosis[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(1): 2-13.
- [37] Stumpp C, Maloszewski P. Quantification of preferential flow and flow heterogeneities in an unsaturated soil planted with different crops using the environmental isotope  $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(3/4): 407-415.
- [38] Yan T B, Wang D Q. 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. [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.]
- [39] Wen Y F, Gu C J, Gao P, et al. Preferential flow reduces overland flow on slopes: Insights from a field experiment on the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 671: 135241.
- [40] Zhao Y, Wang L. Determination of groundwater recharge processes and evaluation of the ‘two water worlds’ hypothesis at a check dam on the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 125989.
- [41] Guo H R. The experimental study and numerical simulation of groundwater recharge processes and preferential solute transport in soils[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. [郭会荣. 优先流影响下的入渗补给过程及溶质运移实验与模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.]
- [42] Feng L, Zhang M S, Liu H, et al. The general patterns of water flow in loess slope system and implications for slope geological security[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 945: 174041.
- [43] Huang Y N, Chang Q R, Li Z. Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 443-452.
- [44] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3071-3092.
- [45] Gerke H H, van Genuchten M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(2): 305-319.
- [46] Šimůnek J, van Genuchten M T. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 782-797.
- [47] Wang C S, Gao F, Sun W Y, et al. Rainfall-infiltration process and characteristics of slope-gully system in the hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(8): 3111-3122. [王承书, 高峰, 孙文义, 等. 黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(8): 3111-3122.]
- [48] Liu Y Y, Zhang Y Z, Wang D, et al. Spatio-temporal patterns of precipitation from 1960 to 2020 over the Loess Plateau[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2025, 36(5): 121-127. [刘艳艳, 张耀宗, 王东, 等. 1960—2020 年黄土高原地区降水特征时空格局研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2025, 36(5): 121-127.]
- [49] Wang L, Wang Q J, Wei S P, et al. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2467-2477.
- [50] Evaristo J. Left high and dry: Deep soil water depletion and ecohydrological resilience on China’s Loess Plateau[J]. *WIREs Water*, 2026, 13(1): e70053.
- [51] Zhao Y L, Wang Y Q, Zhou J X, et al. Spatiotemporal variation and controlling factors of dried soil layers in a semi-humid catchment and relevant land use management implications[J]. *Catena*, 2024, 240: 107973.
- [52] Liu S Z, van Meerveld I, Zhao Y L, et al. Seasonal dynamics and spatial patterns of soil moisture in a loess catchment[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2024, 28(1): 205-216.
- [53] Zhou Z X, Wang Y Q, Zhang C C, et al. Expansion and intensification of deep soil drying on the Loess Plateau of China over the last three decades[J]. *Geoderma*, 2025, 461: 117459.
- [54] Jiang W J, Wang G C, Sheng Y Z, et al. Isotopes in groundwater (2H, <sup>18</sup>O, <sup>14</sup>C) revealed the climate and groundwater recharge in the Northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 298-307.
- [55] Xiang W, Evaristo J, Li Z. Recharge mechanisms of deep soil water revealed by water isotopes in deep loess deposits[J]. *Geoderma*, 2020, 369: 114321.
- [56] Wang Y Q, Hu W, Sun H, et al. Soil moisture decline in China’s monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change[J]. *PNAS*, 2024, 121(15): e2322127121.
- [57] Li P, Li T L, Vanapalli S K. Influence of environmental factors on the wetting front depth: A case study in the Loess Plateau[J]. *Engineering Geology*, 2016, 214: 1-10.
- [58] Ma L N, Qi S W, Guo S F. Hydrologic characteristics and settlement deformation of backfilled loess in Yan’an, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2025, 36(3): 1198-1212.
- [59] Luo Z Z, Niu Y N, Li L L, et al. Response of soil physical properties to alfalfa growth years in the Western Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(11): 1500-1507. [罗珠珠, 牛伊宁, 李玲玲, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土壤物

理性质对苜蓿种植年限的响应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1500-1507.]

[60] Ji W J, Huang Y N, Shi P J, et al. Recharge mechanism of deep soil water and the response to land use change in the loess deposits[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125817.

[61] Li T L, Wang Y, Hu X Y, et al. Discussion on preferential flow and piston flow in thick loess vadose zone[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(6): 1842-1848. [李同录, 汪颖, 胡向阳, 等. 厚层非饱和黄土中优势流和活塞流的讨论[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1842-1848.]

[62] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.

[63] Li H Y, Luo Y, Sun L, et al. Modelling the artificial forest (*Robinia pseudoacacia* L.) root-soil water interactions in the Loess Plateau, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(1): 17-34.

[64] Zhao K Y, Xu Q, Liu F Z, et al. Field monitoring of preferential infiltration in loess using time-lapse electrical resistivity tomography[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125278.

[65] Jiang X J, Liu X E, Wang E H, et al. Effects of tillage pan on soil water distribution in alfalfa-corn crop rotation systems using a dye tracer and geostatistical methods[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 150: 68-77.

[66] Chen J S, Liu Z, Liu X Y. Deep-circulation groundwater maintains continuous deposition of dusty particles in Loess Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 278-287. [陈建生, 刘震, 刘晓艳. 深循环地下水维系黄土高原风尘颗粒连续沉积[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 278-287.]

[67] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Spatial variability of soil water for the entire profile in the critical zone of the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 515-522. [乔江波, 朱元骏, 贾小旭, 等. 黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 515-522.]

[68] Rutter N, Ding Z L. Loess in China and global change[J]. Quaternary Sciences, 1992, 12(1): 2-11. [Rutter N, 丁仲礼. 中国黄土和全球变化[J]. 第四纪研究, 1992, 12(1): 2-11.]

[69] Li L, Wang J D, Dong H Y, et al. Hysteretic collapse in loess-paleosol strata: Mechanisms and regulatory role of paleosol[J]. Catena, 2025, 259: 109380.

[70] Huang Y W, Yang T, Li G Q. Slope stability in the south bank of Jing River considering irrigation infiltration effect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 91-95, 110. [黄永威, 杨涛, 李冠奇. 考虑灌溉渗透作用下泾河南塬边坡稳定性研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 91-95, 110.]

[71] Feng L, Zhang M S, Jin Z, et al. The genesis, development, and evolution of original vertical joints in loess[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 214: 103526.

[72] Li Y R, Wang Y Y, Aydin A. Loess structure: Evolution and a scale-based classification[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 249: 104665.

[73] Wallender W W, Grimes D W, Henderson D W, et al. Estimating the contribution of a perched water table to the seasonal evapotranspiration of cotton[J]. Agronomy Journal, 1979, 71(6): 1056-1060.

[74] Zhao Z Q, Dai F C, Min H, et al. Field infiltration of artificial irrigation into thick loess[J]. Engineering Geology, 2021, 294: 106388.

[75] Zhu X M. The formation and significance of loess-soil structure profile[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(2): 1-9. [朱显谟. 黄土—土壤结构剖面构型的形成及其重要意义[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 1-9.]

[76] Li Z K, Ma P H, Peng J B, et al. The permeability characteristics of loess and red clay interface in Heifangtai area[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1516-1527. [李泽坤, 马鹏辉, 彭建兵, 等. 黑方台区域黄土红黏土界面渗透特性研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1516-1527.]

[77] Zhao K Y, Xu Q, Chen W L, et al. Infiltration process of loess in flood irrigation area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2754-2764. [赵宽耀, 许强, 陈婉琳, 等. 黄土塬边漫灌区土体水入渗过程研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2754-2764.]

[78] Li X A, Peng J B, Zheng S Y, et al. A study on origin of loess caves in Loessal Plateau[J]. Highway, 2005(11): 142-146. [李喜安, 彭建兵, 郑彦彦, 等. 黄土高原地区黄土洞穴的成因研究[J]. 公路, 2005(11): 142-146.]

[79] Ji Z X, Ziegler A D, Wang L. Perched groundwater recharge and subsurface flow dynamics in check-dam systems of the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2026, 670: 135193.

- [80] Du Z D, Zhao Y J, Cheng J R. Unsaturated seepage test in loess[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(2): 50-52. [独仲德, 赵英杰, 程金茹. 黄土非饱和渗流试验研究[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(2): 50-52.]
- [81] Cai L, Wang F, Lin Y Y, et al. Changes in preferential flow caused by root effects in black locust plantations of different stand ages in the semi-arid region of the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2024, 634: 131086.
- [82] Liu P, Ke X M, Wang W, et al. Experimental simulation of water and air migration under the presence of fissures and paleosols in unsaturated loess slopes[J]. Hydrogeology Journal, 2022, 30(5): 1583-1597.
- [83] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(3): 279-302.
- [84] Tokunaga T K, Wan J M. Water film flow along fracture surfaces of porous rock[J]. Water Resources Research, 1997, 33(6): 1287-1295.
- [85] Feng L T, Wu W J, Liu X R, et al. Precipitation infiltration modes and landslides in the Loess Plateau: A case study of Gansu loess area[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 5937-5945. [冯乐涛, 吴玮江, 刘兴荣, 等. 黄土高原降水入渗方式与引发滑坡研究——以甘肃黄土地区为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5937-5945.]
- [86] Zou X Y, Xu Q, Peng D L, et al. Influencing factors of formation of typical loess sinkhole in Heifangtai[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(28): 58-64. [邹锡云, 许强, 彭大雷, 等. 黑方台典型黄土洞穴形成的影响因素[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(28): 58-64.]

(责任编辑: 檀满枝)