DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260918

高速路基超疏水隔水层施工与隔水效果监测

王治波
(云南瑞弄高速公路有限公司,云南 昆明 650000)

摘 要: 针对高降雨地区高速公路路基受降雨入渗及毛细水迁移影响导致含水率升高的问题,依托云南瑞丽至弄岛高速公路试验段,采用超疏水聚合物构建路基隔水层,并基于FDR技术开展连续原位含水率监测。试验段全长100 m,其中超疏水试验段与普通路基对照段各50 m,共布设5组FDR传感器。结果表明:30~60 cm浅层含水率波动最明显,主要为12%~18%;80 cm附近波动明显减弱;100~140 cm深层含水率较高,多维持在24%~34%。与对照区相比,试验区浅层含水率峰值及波动幅值明显减小,响应存在一定滞后,且深层高含水率未持续向0~80 cm隔水包裹区传递,表明超疏水隔水层可有效削弱路基内部水分迁移,提高水分场稳定性。

关键词: 超疏水隔水层;高速公路路基;FDR监测;体积含水率;毛细水迁移
中图分类号: U416;TU997 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0316-06

Construction and Water-Barrier Performance Monitoring of a Superhydrophobic Layer in Highway Subgrade

WANG Zhibo
(Yunnan Ruinong Expressway Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: To address the increase in moisture content of highway subgrades in high-rainfall regions caused by rainfall infiltration and capillary water migration, a field test section of the Ruili – Nongdao Expressway in Yunnan Province was selected. A superhydrophobic polymer was used to construct a water-barrier layer in the subgrade, and continuous in-situ moisture-content monitoring was conducted using frequency domain reflectometry (FDR). The test section was 100 m long, consisting of a 50 m superhydrophobic treatment section and a 50 m conventional subgrade control section, with five groups of FDR sensors installed. The results showed that moisture fluctuations were most pronounced in the shallow layer at depths of 30 – 60 cm, where the volumetric water content mainly ranged from 12% to 18%; the fluctuations decreased markedly near a depth of 80 cm; and the deeper layer at depths of 100 – 140 cm maintained relatively high moisture contents, generally ranging from 24% to 34%. Compared with the control section, the superhydrophobic treatment section exhibited significantly lower peak moisture contents and smaller fluctuation amplitudes in the shallow layer, together with a certain lag in moisture response. Moreover, the high moisture content in the deeper layer did not continuously propagate into the 0 – 80 cm zone enclosed by the water-barrier layer. These results indicate that the superhydrophobic water-barrier layer can effectively suppress moisture migration within the subgrade and improve the stability of the internal moisture field.

Keywords: superhydrophobic water-barrier layer; highway subgrade; FDR monitoring; volumetric water content; capillary water migration

0 引 言

随随着高速公路建设向高降雨及高湿地区延伸,路基长期服役过程中易受降雨入渗、边坡渗流及地下水迁移影响,导致填料含水率升高,并进一步引发强度衰减、结构软化及差异变形等病害。尤其在高温高湿环境下,路基内部水分迁移与累积现象更加明显,含水率变化已成为影响路基长期稳定性的重要因素[1-4]。

目前,路基隔水处理主要采用石灰土、水泥稳定土、级配碎石及土工膜等材料[5]。其中,无机类隔水材料主要通过提高土体密实度降低渗透能力,但存在干湿循环后易开裂、长期抗渗稳定性不足等问题;柔性防渗材料虽具有较好的初期隔水性能[6-8],但长期服役过程中易出现老化、破损及界面失效现象。

近年来,超疏水聚合物材料因具有低表面能特

收稿日期:2026-08-17
基金项目:云南省交通运输厅科技创新及示范项目(2025-111)
作者简介:王治波(1979—),男,学士,高级工程师,从事高速公路技术管理工作。

性[9-10]，可在土颗粒表面形成稳定疏水膜结构，有效削弱毛细作用及水分迁移能力。已有研究表明，超疏水改性土在降低吸水率、减小毛细水上升高度及提高抗渗性能等方面具有较好效果，其隔水机制由传统“致密阻水”逐渐转变为“界面疏水阻水”。

然而，现有研究主要集中于室内条件下超疏水改性土的接触角、吸水率及抗渗性能分析[11-15]，对于超疏水隔水结构在实际路基服役环境中的长期作用效果研究仍较缺乏[16-17]，尤其缺少基于现场长期监测的含水率演化数据，对不同深度及不同空间位置路基内部水分迁移规律尚未形成系统认识。

频域反射法[18]（frequency domain reflectometry，FDR）具有响应速度快、连续监测能力强及对土体扰动小等特点，可有效反映路基内部水分迁移及含水率变化过程。基于此，本文依托云南瑞丽至弄岛高速公路现场试验段，采用超疏水聚合物材料构建路基隔水层，并利用 FDR 传感器建立长期含水率监测体系，对不同位置及不同深度路基含水率变化规律进行分析，评价超疏水隔水层在监测期内的隔水效果。

1　工程概况

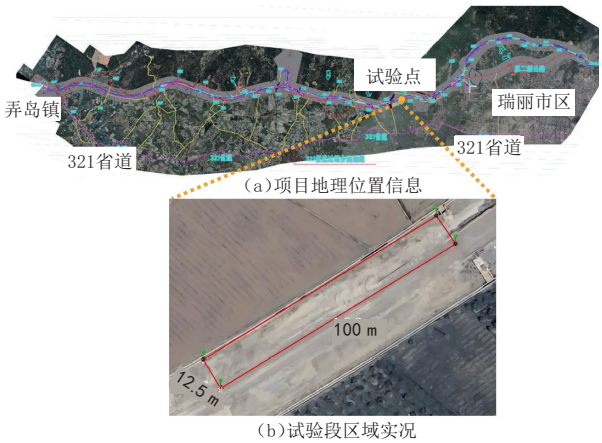
瑞丽至弄岛高速公路改扩建工程位于云南省德宏州瑞丽市境内，路线东起勐卯镇贺德村，西至弄岛镇雷允村，全长约 30.383 km。研究区属南亚热带季风气候，年降雨量较大，雨季主要集中于 6—10 月，降雨入渗作用明显。沿线以低山丘陵及河谷地貌为主，路基形式主要为填方路基，填料以黏性土及风化堆积层为主。

本研究选取瑞弄高速典型路段开展现场试验研究，试验段总长 100 m，其中 50 m 为超疏水隔水层试验段，50 m 为普通路基对照段。试验路段采用超疏水聚合物材料构建上、下部隔水层，并结合边坡区域封闭处理，形成包裹式超疏水隔水体系，以削弱降雨入渗及下部毛细水向路基浅层迁移。项目地理位置及试验段情况见图 1。

2　隔水路基施工

2.1　施工材料

在超疏水隔水层施工前，对试验段灰砂土进行了土体性质检测，包括酸碱性、含水率及物理指标等。试验结果表明，土样 pH 值为 8.0，呈碱性，满足超疏水成膜反应要求；适宜压实含水率约为 8.3%，比



（a）项目地理位置信息
（b）试验段区域实况

图 1　项目地理位置信息及试验段区域实况

重约为 1.5t/m³，24 h 泡水吸水率为 0.7%。土样试验结果见表 1。

表 1　土样试验结果

项目	土样试验	说明
pH 值/25.1C°	8.00	碱性土壤
合适含水率	约 8.3%	压路合适含水率
比重/(t·m^{-3})	1.5	含石比重 1.6

完成土体性质检测后，开展超疏水材料配制及喷洒设备调试。现场采用浓缩型超疏水乳液，按活性物与土体质量比 0.12% 进行稀释，即每 1 kg 浓缩液加入 9 kg 清水，并采用机械搅拌不少于 5 min，形成均匀稳定的乳白色施工液后投入使用。所用超疏水材料主要由约 6% 活性物、10% 乳化剂及 84% 水组成，其主要物理化学性能见表 2。

2.2　施工工艺

超疏水隔水层施工采用“基层整平—乳液喷洒—机械翻拌—分层碾压—表层封闭—边坡喷洒”的工艺流程，如图 2 和图 3 所示。

施工过程中，首先对路床表面进行清理与整平，并控制土体含水率满足施工要求。随后采用专用喷洒设备均匀喷洒超疏水乳液，其中路床区域喷洒量控制为 15 kg/m²，边坡区域喷洒量控制为 3 kg/m²。乳液喷洒完成后，采用旋耕机进行 2 ~ 3 遍翻拌，使超疏水乳液与土体充分混合，提高乳液分布均匀性。隔水层采用分层铺筑施工，单层松铺厚度控制为 15 ~ 20 cm。碾压施工采用重型振动压路机，并按照“静压 1 遍—振压 3 ~ 4 遍—静压 1 遍”顺序进行压实，压实度控制不低于 96%。下层超疏水隔水层施工完成后，铺设 GSL50/HDPE 土工格栅，并进行分层回填压实，随后开展上层超疏水隔水层施工。上层隔水层施工采用“喷洒—翻拌—压实—封层”工艺。压实完成后，在隔水层表面进行封层喷洒处理，以增强表层

表 2　超疏水材料性质

序号	项目	技术指标	标准依据
1	pH 值	7±1	《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077—2012)
2	黏度(23.0 ℃)/(Pa·s)	3.77×10^{-2}	《胶粘剂粘度的测定 单圆筒旋转粘度计法》(GB/T 2794—2013)
3	固体质量分数	≥34%	《合成树脂乳液试验方法》(GB/T 11175—2002)
4	外观	乳白色均匀液体	—
5	稳定性	600 r/min 离心后无分层、无漂油、无明显沉淀	(GB/T 2063—2006)
	吸水率比	13%	《建筑表面用有机硅防水剂》(JC/T902—2002)(2017))
8	接触角(水珠接触角)	≥150°	《纳米薄膜接触角测量方法》(GB/T 30447—2013)
9	水珠表面流动性(黏性)	水滴可自由流动	—
10	有机挥发物 VOC	≤3%	《建筑防水涂料中有害物质限量》(JC 1066—2008)
11	游离甲醛、苯、甲苯、二甲苯、氨、苯酚	符合《建筑防水涂料中有害物质限量》(JC 1066—2008)	《建筑防水涂料中有害物质限量》(JC 1066—2008)

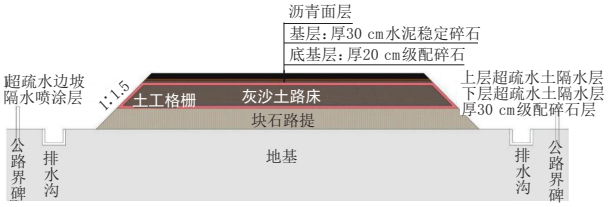


图 2　高速公路路基隔水层(红线)示意图

抗渗能力和结构完整性。边坡区域采用雾化喷洒方式分两遍进行超疏水处理，并对坡脚及局部易渗区域进行加强喷洒。喷洒完成后进行自然养护与固化，养护期间避免施工扰动及雨水冲刷。



(a)下层超疏水土隔水层施工流程



(b)上层超疏水土隔水层施工流程

图 3　施工流程图

2.3　传感器布设

为监测超疏水隔水层作用下路基内部含水率变化规律，在试验段纵向共布设 5 组 FDR 含水率传感器，其中中部试验区布设 3 组，两侧对照区各布设 1 组。各测点间距约 20 m，并沿路基横向中心线布设。传感器采用钻孔埋置方式安装，监测深度分别为地表以下 30、40、50、60、80、100、120 及 140 cm，共设置 8 个监测层位，如图 4 所示。钻孔完成后，采用泥浆状原状土回填介质增强传感器与周围土体接触密实性，随后将传感器缓慢下放至设计深度，并排除孔内空气及多余泥浆，以保证感应探头与土体充分接触。安装完成后，对孔口进行分层回填与轻压密实处理。含水率监测采用 FDR 频域反射法，利用传感器电极周围介电常数变化反演土体含水率。所有测点均采用自动采集系统进行连续监测，采样频率设置为 2 h/次。

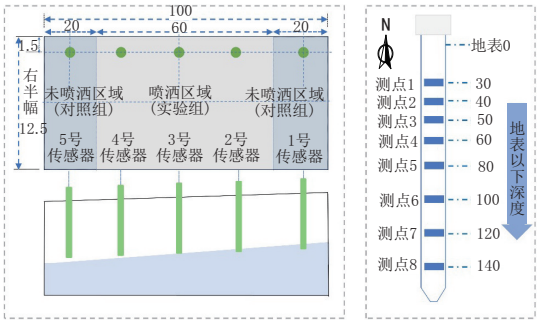


图 4　传感器布设示意图

传感器安装完成后，对隔水层进行 1 ~ 2 d 自然养护，养护期间避免施工扰动及雨水冲刷，以保证超疏水乳液在土颗粒表面充分固化并形成稳定隔水膜层。养护过程中同步检查表层干燥状态及局部完整性，确保隔水层结构稳定。

3　现场数据监测分析

试验段于 2025 年 10 月—2026 年 5 月开展路基体积含水率连续监测，现场监测周期约 8 个月。综合考虑监测数据完整性及传感器运行稳定性，选取 2026 年 2 月作为典型分析时段。该阶段监测曲线连续性较好，能够较清晰反映不同深度含水率变化特征以及试验区与对照区之间的水分场差异。

3.1　同一传感器不同深度含水率变化特征分析

由图 5 可见，5 组传感器在 30、40、50、60、80、100、120 和 140cm 深度处均形成了连续监测曲线，整体呈现出明显的深度分层特征。30 ~ 60 cm 浅层含水率波动最为明显，曲线多次呈现“升高—回落”的变化过程，体积含水率主要在 12% ~ 18% 范围内变化，局部可达到 20% 左右，表明浅层土体对外界水分输入较为敏感。结合研究区高湿多雨的环境背景，降雨入渗可能是浅层含水率波动的重要影响因素之一。

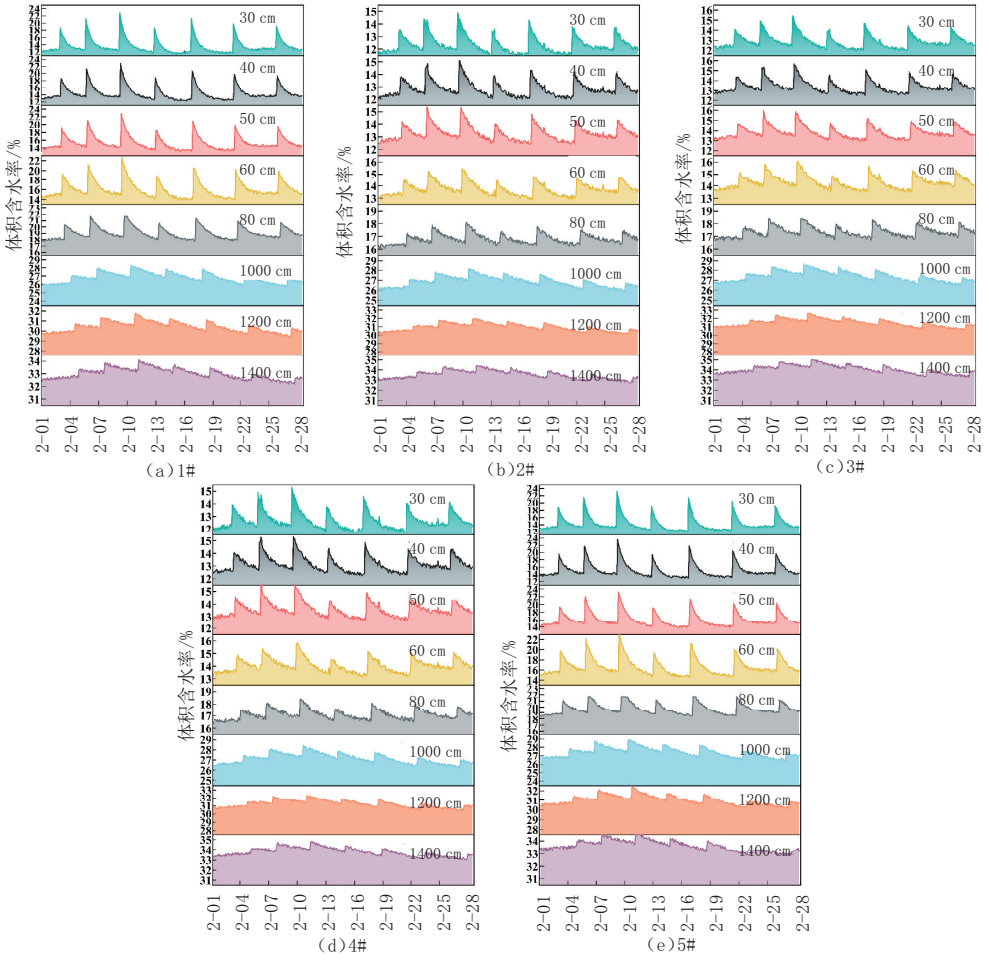


图 5　不同传感器各深度体积含水率响应特征曲线

80cm 位于超疏水隔水层包裹区下边界附近，含水率变化由浅层的强波动逐渐转为相对平缓，峰值幅度明显减小，曲线突增现象明显弱于 30 ~ 60 cm 浅层。这表明水分向下迁移至 80cm 附近时受到隔水层阻滞，入渗过程不再表现为快速贯通式传递。

100 ~ 140 cm 深层含水率整体高于浅层，多维持在 24% ~ 34%，且时序变化相对平缓，未呈现浅层明显的尖峰型波动。该特征表明深层水分状态具有较强稳定性，并与下部持续水分补给的特征相符，推测毛细作用可能是其重要影响因素之一。

路基含水率沿深度方向可划分为 3 个区域：30 ~ 60 cm 浅层波动敏感区、80 cm 水分迁移过渡区和 100 ~ 140 cm 深层高含水区。该分层特征与 0 ~ 80 cm 超疏水隔水层包裹结构相对应，说明超疏水隔水层改变了路基内部水分的垂向迁移规律。

3.2　不同传感器同一深度含水率变化特征分析

由图 6 可见，同一深度下 5 组传感器含水率曲线差异较明显。1 号和 5 号传感器位于未喷洒对照区，2 号、3 号和 4 号传感器位于超疏水隔水试验区。30 ~ 50 cm 浅层对比最为明显，对照区曲线峰值较高且波动频繁，尤其 1 号和 5 号传感器在典型波动阶段出现较明显峰值，体积含水率可由约 13% ~ 15% 升至 18% ~ 21%；相比之下，试验区 2 号、3 号和 4 号传感器整体波动较缓，体积含水率主要集中于 12% ~ 17%。

在 60 ~ 80 cm 深度，不同传感器之间的差异逐渐减弱，但对照区含水率响应仍相对明显，试验区曲线则保持较高稳定性，表明在隔水层包裹范围内，超疏水处理降低了水分在路基中的进一步迁移能力，使试验区同一深度下的含水率波动幅值整体小于对照区。

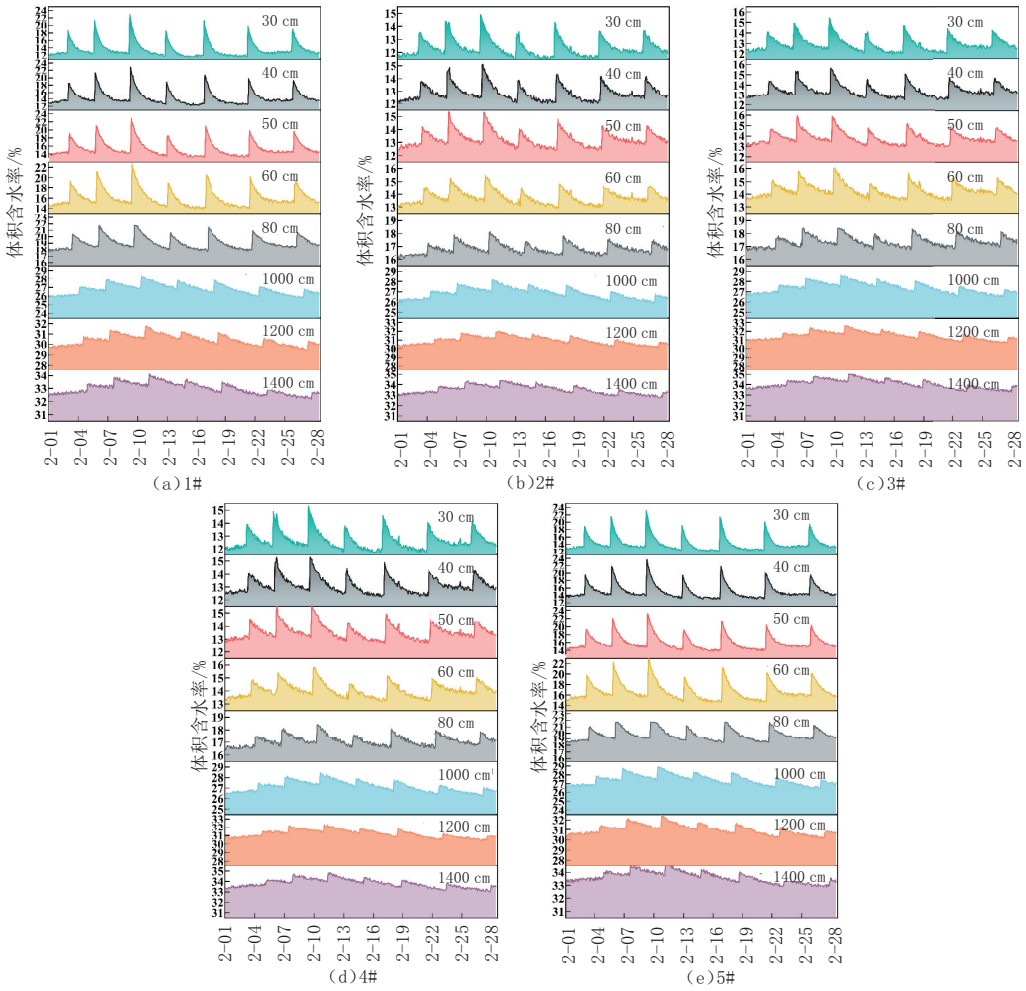


图 6　不同深度各传感器体积含水率响应特征曲线

在 100 ~ 140 cm 深层范围内，各传感器含水率整体升高，说明该区域可能持续受毛细水补给影响。尽管深层含水率维持在较高水平，但试验区浅层含水率未随之同步明显升高，表明 0 ~ 80 cm 隔水包裹层对深浅层之间的水分交换具有一定阻隔作用。

3.3　不同深度含水率响应差异及隔水作用分析

从 FDR 时序曲线可以看出，30 ~ 40 cm 浅层含水率波动较为频繁，50 ~ 80 cm 波动幅度逐渐减弱，部分峰值相对于浅层呈现一定的时间后移；100 ~ 140 cm 深层则主要表现为缓慢变化。由此表明，路基内部水分变化沿深度方向具有明显的衰减和相对时滞特征。这说明水分在路基中的迁移过程并非瞬时完成，而是受土体孔隙结构、压实状态及超疏水界面共同控制。

对照区曲线表现为典型的快速响应特征，降雨或地表补水后浅层含水率迅速升高，随后逐步衰减，说明普通路基内部水分迁移通道连续。试验区曲线则表现为峰值降低、波动减缓及响应时间延后，表明超疏水隔水层降低了水分在土体孔隙中的连续迁移能力。0 ~ 80 cm 隔水层包裹范围内含水率整体保持相对稳定，30 ~ 60 cm 浅层虽存在一定幅度变化，但峰值和波动幅度均小于对照区。100 ~ 140 cm 深层则长期处于较高含水状态，而其变化未持续向 30 ~ 80 cm 范围同步传递。上述特征表明，超疏水隔水层可在一定程度上削弱深浅层之间的水分交换，使隔水包裹区保持相对稳定的含水状态。

3.4　试验区与对照区隔水效果对比分析

对比试验区与对照区可以看出，超疏水隔水层的作用主要表现为含水率波动幅值减小、峰值降低、响应延迟以及深浅层水分交换减弱。对照区 1 号和 5 号传感器在 30 ~ 60 cm 浅层中多次出现明显峰值，曲线呈现较强尖峰响应特征，表明普通路基浅层对外界水分输入的响应较为敏感。相比之下，试验区 2 号、3 号和 4 号传感器在相同深度下曲线整体更平缓，峰值增幅明显减小，表明超疏水处理降低了浅层土体吸水及连续传水能力。从垂向分布看，对照区浅层波动较大，且深层含水率维持较高水平，说明普通路基深浅层水分变化具有较明显的联系；试验区则表

现为“浅层低波动、深层高含水”的分层特征。虽然 100 ~ 140 cm 深层含水率整体较高，但其未向 0 ~ 80 cm 隔水包裹区持续传递，说明超疏水隔水层对上下水分交换具有明显阻隔作用，试验区路基内部水分场较对照区更稳定，表明超疏水隔水层能够有效抑制路基内部水分迁移和深浅层水分交换。

4　结　论

（1）监测期内路基含水率呈明显垂向分层特征，30 ~ 60 cm 浅层波动最为显著，80 cm 附近波动明显减弱，100 ~ 140 cm 深层维持较高且相对稳定的含水状态。

（2）超疏水隔水层显著改变了路基内部水分迁移规律。与对照区相比，试验区 0 ~ 80 cm 隔水包裹范围内含水率峰值明显降低，波动幅值减小，曲线变化更加平缓，说明超疏水处理能够降低隔水包裹区内的水分波动，并对路基内部水分迁移产生抑制作用。

（3）不同深度含水率响应具有明显滞后性。浅层测点响应最快，随深度增加峰值逐渐减弱并出现延迟；超疏水试验区峰值响应时间进一步滞后，表明隔水层降低了路基内部水分迁移速率。

（4）100 ~ 140 cm 深层区域在监测期内保持较高含水率，但其未持续向 0 ~ 80 cm 隔水包裹区传递，说明超疏水隔水层对毛细水上移具有明显阻隔作用，能够提高浅层路基水分场稳定性，在当前监测期内表现出较好的隔水效果。

参考文献：

[1] 段旭，董琪，门玉明，等. 黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究[J]. 岩土工程学报，2018，40(9)：1753-1758.
[2] 黎瀚文，张璐璐，冯世进，等. 复杂大气环境作用下高铁路基水分迁移响应[J]. 岩土力学，2018，39(7)：2574-2582.
[3] 潘威，岳建伟. 降雨入渗路基边坡含水率变化分析[J]. 公路交通科技，2022，39(10)：25-31.
[4] 王家琛，朱鸿鹄，王静，等. 基于主动加热光纤法的毛细阻滞入渗模型试验研究[J]. 岩土工程学报，2021，43(1)：147-155.
[5] 张宪雷，刘贺松，马少帅，等. 室内加速水环境温度 PVC-P 土工膜老化试验研究[J]. 岩土工程学报，2025，47(12)：2478-2487.
[6] 贾志刚，张鹏，王泳丹，等. 高分子柔性防渗防护材料抗老化性能研究[J]. 水利与建筑工程学报，2025(6)：130-136.
[7] 刘维正，曾奕珺，姚永胜，等. 含水率变化下压实路基土动态回弹模量试验研究与预估模型[J]. 岩土工程学报，2019，41(1)：175-183.
[8] 温小平，翁兴中，张俊，等. 新疆地区粗颗粒盐渍土毛细水上升和隔断层隔断效果研究[J]. 公路交通科技，2015，32(5)：56-60；67.
[9] 陈伟，韩建红，徐宏，等. 超疏水材料改性黄土疏水机理及强度演化特性研究[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(5)：2140-2150.
[10] 田雷，邱流潮.（超）疏水水泥基材料的研究进展[J]. 材料导报，2021，35(19)：19070-19080.
[11] 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.
[12] 赵志强，戴福初，闵弘，等. 黄土中灌溉水入渗过程的现场试验研究[J]. 岩土工程学报，2022，44(3)：569-575.
[13] 王康宇，叶佳欢，王城泉. 降雨条件下路基土体湿度场迁移预测模型[J]. 工程科学与技术，2026，58(1)：68-79.
[14] 李淑娥，陈志明，徐永福，等. 基于颗粒分布分形模型毛细水上升高度计算分析[J]. 岩土工程学报，2024，46(10)：2221-2228.
[15] 焦卫国，刘振男，季永新，等. 红黏土覆盖层水力参数演变规律与防渗设计讨论[J]. 岩土工程学报，2022，44(1)：45-52.
[16] 朱江江. 江西地区重载铁路路基含水率原位监测试验研究[J]. 铁道标准设计，2021，65(4)：41-45.
[17] 许国俊，高峰，肖林，等. 考虑动荷载诱发路基土水分迁移特性的 Green-Ampt 模型改进[J]. 公路交通科技，2025，42(10)：216-225.
[18] 董翰川，庞丽丽，史云. 频域反射分析法测定土壤含水率标定试验研究[J]. 水文地质工程地质，2019，46(3)：55-61.