doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.035

根域微集水-有机物料协同调控影响山地果园土壤内力及团聚体稳定性机制研究

吴淑芳[1]　李孟佳[1]　王建平[2]　李　斌[3]　胡斐南[4]　冯　浩[4]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;
2.延安市宝塔区果业局,延安 716000;3.天水市秦州区水务局,天水 741000;
4.西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:黄土高原雨养果园面临土壤贫瘠化与季节性干旱双重胁迫,制约苹果产业可持续发展。针对现有集水技术虽提升水分利用效率,但难以协同改良土壤结构,且对土壤内力与团聚体稳定性的调控机制尚不明确的问题,本研究以陕北丘陵沟壑区雨养果园为研究对象,提出了根域微集水-有机物料协同调控技术,通过覆膜集雨、多孔导流与有机配施,系统探究其对土壤水分、土壤电化学性质、颗粒间内力及团聚体稳定性的影响。共设置 4 个处理:无集雨措施,不施有机物料(CK)、根域微集水(T1)、根域微集水结合有机物料(M1、M2,用量为 28.0、44.0 kg/棵)。结果表明,根域微集水与有机物料相结合,较 CK 显著提高了 0~180 cm 土层土壤贮水量,尤其是高用量 M2 处理;提高了土壤胶体颗粒的表面电荷数量、表面电荷密度、比表面积和电场强度,变化范围分别为 5.775~6.595 cmol/kg、0.253~1.717 c/m^2、8.438~23.853 m^2/g、3.570 8×10^9~2.423 05×10^{10} V/m,0.5 nm 处静电斥力(P_{ele})较 CK 增加了 25.93~165.34 atm,2.0 nm 处范德华引力(P_{vdw})较 CK 增加了 13.30~70.95 atm,进而影响土壤净作用力(P_{net});同时提高了土壤大团聚体含量和团聚体的稳定性。M2(微集水与高量有机物料处理)在所有土层中改善效果最好,平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和大团聚体含量($DR_{0.25}$)分别较 CK 提升了 27.74%、68.45%、13.17%,分形维数较低,团聚体稳定性最好。该研究揭示了电化学特性-颗粒内力-团聚体稳定性的级联调控机制,为黄土高原果园水肥协同增效与地力提升提供了理论依据。

关键词:根域微集水;雨养果园;电化学性质;土壤内力;团聚体稳定性

中图分类号:S153　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0370-12　　**OSID**:

Mechanisms Underlying Effects of Integrated Root-zone Micro-water Harvesting and Organic Amendment on Soil Internal Forces and Aggregate Stability in Mountainous Orchards

Wu Shufang[1]　Li Mengjia[1]　Wang Jianping[2]　Li Bin[3]　Hu Feinan[4]　Feng Hao[4]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Yan'an Baota District Fruit Industry Bureau, Yan'an* 716000, *China*
3. *Qinzhou District Water Affairs Bureau of Tianshui City, Tianshui* 741000, *China*
4. *State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Apple orchards on the Loess Plateau face dual constraints of soil impoverishment and seasonal drought, which threaten the sustainability of the apple industry. Although water-use efficiency can be improved by existing water-harvesting technologies, soil structure is often not concurrently enhanced, and the mechanisms regulating soil interparticle forces and aggregate stability remain poorly understood. To address these limitations, an integrated root-zone microcatchment water-harvesting and organic-amendment strategy was developed for rainfed orchards in the hilly and gully region of northern Shaanxi Province. By combining plastic-film rainwater harvesting, porous water diversion, and organic amendment application, the effects of this strategy on soil moisture, soil electrochemical properties,

收稿日期:2025-08-21　修回日期:2025-10-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1900300)

作者简介:吴淑芳(1977—),女,研究员,博士,主要从事旱区中低产田土壤改良及水肥高效利用研究,E-mail:wsfjs@163.com

interparticle forces, and aggregate stability were systematically investigated. Four treatments were established: control (CK, no water harvesting or organic amendment), root-zone micro-water harvesting (T1), and root-zone micro-water harvesting combined with organic amendments at two rates (M1: 28.0 kg per plant; M2: 44.0 kg per plant). The results demonstrated that the combined root-zone micro-water harvesting and organic amendment significantly increased soil water storage in the 0 ~ 180 cm layer compared with CK, particularly under the high-application M2 treatment. It also enhanced the surface charge quantity (5.775 ~ 6.595 cmol/kg), surface charge density (0.253 ~ 1.717 c/m^2), specific surface area (8.438 ~ 23.853 m^2/g), and electric field strength ($3.570\,8 \times 10^9$ ~ $2.423\,05 \times 10^{10}$ V/m) of soil colloidal particles. Consequently, the electrostatic repulsion (P_{ele}) at 0.5 nm was increased by 25.93 ~ 165.34 atm, and van der Waals attraction (P_{vdw}) at 2.0 nm was increased by 13.30 ~ 70.95 atm compared with that of CK, thereby altering the net interparticle force (P_{net}). These changes were accompanied by increases in macroaggregate content and aggregate stability. M2 produced the greatest improvements across all soil layers, increasing mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and macroaggregate content ($DR_{0.25}$) by 27.74%, 68.45%, and 13.17%, respectively, compared with CK. Its lower fractal dimension further indicated the highest aggregate stability. These findings reveal a cascading regulatory mechanism linking soil electrochemical properties, interparticle forces, and aggregate stability, providing a theoretical basis for improving water-nutrient synergy and soil fertility in orchards on the Loess Plateau.

Key words: rhizosphere micro-water harvesting; rainfed orchard; electrochemical properties; soil internal forces; aggregate stability

0　引言

黄土高原作为我国苹果主产区，其雨养果园长期面临土壤贫瘠化和季节性干旱的双重胁迫。该区域土壤质地松散（黏粒含量小于 17%）、有机质匮乏（小于 1.5%），雨季暴雨导致严重水土流失，旱季水分亏缺又加剧土壤团聚体破碎，这些问题共同制约着苹果产业的可持续发展[1-2]。为应对这一困境，研究者先后开发了蓄水坑灌、肥水坑施及坡地鱼鳞坑与集雨坑相结合技术[3-5]。然而，这些传统技术不仅工程量大，且仅能针对单一资源限制（如水分或养分）进行局部改善，难以从根本上解决制约旱地果园发展的“水肥协同困境”问题。

在此背景下，根域水肥协同调控技术应运而生。该技术通过将水分和养分精准输送至植株根系密集区，不仅有效缓解季节性干旱，显著提高水肥利用效率，还能通过有机物料的应用持续改善土壤肥力，为植株生长创造更适宜的环境，国内外学者在水肥协同调控方面也进行了大量探索。王小赟等[6]采用垄沟集雨技术，并配合生物炭覆盖，增加了水分利用效率，使土壤贮水量增加 6.2 ~ 41.7 mm；张彬彬等[7]在黄土丘陵区山地果园采用有机物料结合鱼鳞坑和集雨坑技术，显著改善了土壤有机质和水分状况；Panigrahi 等[8]采用连续沟槽与生草覆盖拦蓄降雨，通过提升雨水利用效率减少了柑橘园的灌溉用水，同时改善了土壤养分状况。

值得注意的是，现有研究多集中于水分和养分的表观效应，而忽视了土壤改良的内在机理。事实上，土壤团聚体作为土壤结构和功能的基本单元，其稳定性直接关系到碳固存和养分保持等生态功能[9]。团聚体的形成和维持本质上是一个多尺度、多因素耦合的复杂过程，主要受到几个关键因素的协同调控：土壤胶体颗粒的电化学性质、颗粒间内作用力以及有机-无机复合体的相互作用[10-11]，但现有技术对内力场与电化学性质的协同调控机制仍不明确。大量研究表明，有机物料输入可显著提升土壤表面电位、表面电荷密度、表面电场强度、比表面积和表面电荷数量[12-13]，而土壤胶体颗粒表面的电荷特性（电荷密度、电场强度等）直接影响颗粒间的相互作用力[14]。颗粒间作用力作为连接电化学性质和团聚体稳定性的关键桥梁，主要包括范德华引力、静电斥力和水合斥力。

然而，上述研究多聚焦单一因素，电化学性质-内力-团聚体稳定性交互作用的系统性研究仍较少。基于此，本研究创新性地提出条状根域微集水-有机物料协同调控技术。该技术在宏观上采用覆膜集雨 + 微垄沟设计，介观上配置多孔导流管系统，微观上利用有机胶体作用，实现水肥运移的多尺度协同优化；同时通过定向施用高腐熟有机物料（羊粪-油渣-秸秆复合），系统探究其对土壤水分、电化学性质、颗粒间内力及团聚体稳定性的影响机制。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验地位于陕西省延安市河庄坪镇万庄村北山雨养苹果园（36.69°N，109.36°E），该地区属于干旱

半干旱气候,气温多变,昼夜温差大,四季分明,年平均降雨量 500 mm 左右,降雨主要集中在 7—9 月,年平均气温 9.4℃,无霜期在 175 ~ 186 d 之间。试验地土壤类型为黄绵土,土质疏松,土层深厚,基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土样基本理化性质[15]

Tab. 1 Basic physicochemical properties of tested soil samples[15]

土层深度/cm	容重/(g·cm⁻³)	土壤质地			饱和质量含水率/%	田间持水量(质量百分比)/%
		黏粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	砂粒质量分数/%		
0 ~ 20	1.38	15.73	24.96	59.30	45.52	40.04
20 ~ 40	1.42	15.99	25.45	58.55	41.91	38.79
40 ~ 60	1.44	18.63	30.27	51.11	46.70	37.92
平均值	1.41	16.78	26.89	56.32	44.71	38.92

1.2 试验设计

田间试验于 2022 年 3 月—2023 年 11 月进行,试验设 4 个处理:无集雨措施 + 不施有机物料(CK)、根域微集水(T1)、根域微集水 + 有机物料 28.0 kg/棵(M1)、根域微集水 + 有机物料 44.0 kg/棵(M2),每个处理重复 3 次,3 棵果树作为一个重复。根域微集水采用园艺地布覆盖结合条状微垄沟设计,并配备多孔 PVC 集雨导流入渗管,田间试验布设如图 1 所示。

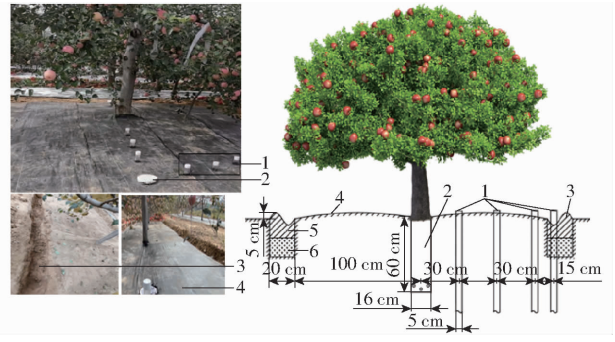


图 1 根域微集水-有机物料协同调控技术田间布设

Fig. 1 Schematic of field layout for rhizosphere micro-water harvesting and organic material co-regulation technology

1. TRIME 管 2. 多孔 PVC 集雨导流入渗管 3. 集雨施肥沟 4. 园艺地布及条状微垄 5. 回填土 6. 腐熟有机物料

园艺地布由聚乙烯窄条材料制成,有效集雨面宽度为 2 m,厚度 0.12 mm,覆盖于地表,引导雨季雨水流向预设的集雨沟;集雨施肥沟距离果树树干 100 cm,宽度为 10 cm,外侧有高 5 cm、宽 10 cm 的微垄,形成集水区;多孔 PVC 集雨导流入渗管长 60 cm,直径 16 cm,安装在两棵果树之间,埋入地下深 60 cm,用来积蓄园艺地布在雨季时排出的雨水;TRIME 管分别布设在距离多孔 PVC 集雨导流入渗管 30、60、90、105 cm 处,管长 200 cm,直径 5 cm,用于苹果生育期土壤含水率的监测。这一设计确保了集雨沟中的雨水能够顺利导入并渗透至管下的有机物料层中,实现雨水的有效存蓄与水肥共同调控。有机物料由干燥的玉米秸秆、葵花籽油渣和羊粪按干重比 4∶3∶3 混合,经高温好氧发酵腐熟而成。发酵过程持续约 45 d,其中不低于 55℃的高温期持续 15 d 以上,其间定期翻堆以确保腐熟完全。腐熟度以发芽指数(GI)大于 80% 为判定标准。所得腐熟有机肥有机质含量为 30.36%,N 含量 1.40%,K_2O 含量 0.38%,P_2O_5 含量 1.95%。

1.3 土样采集与测定

2023 年 10 月苹果成熟落果后在田间取样,每个处理多点分层取样,每隔 20 cm 采集 0 ~ 60 cm 土层的原状土样分别装入不锈钢铝盒,用于团聚体分析。同时均匀采集每个处理 0 ~ 60 cm 土层土壤,分别装入自封袋中,用于土壤表面电化学性质及颗粒间内作用力的测定。

1.3.1 土壤贮水量

试验区土壤体积含水率使用时域反射仪 TDR(TRIME - PICO IPH2 型,IMKO,德国)结合配套的 PICO - BT 蓝牙模块联合测定。分别于 2022 年和 2023 年果树生育期用探针测定 0 ~ 180 cm 土壤体积含水率,测量步长为 20 cm,每月上、中、下旬各测一次,每个处理重复 3 次取平均值。土壤贮水量 W 计算公式为

$$W = \sum_{i=1}^{n} 10\theta_i h_i \tag{1}$$

式中 θ_i——第 i 层土壤体积含水率,%

h_i——第 i 层土层厚度,cm

1.3.2 土壤表面电化学性质

根据物质表面参数联合测定原理[16],通过去除碳酸钙、制备氢饱和样、离子交换吸附试验测定土壤颗粒表面电化学性质。测定指标包括表面电位(φ_0)、表面电荷密度(σ_0)、表面电场强度(E_0)、比表面积(S)、表面电荷数量(N_{SC}),计算公式为

$$\varphi_0 = \frac{2RT}{2\beta_{Ca} - \beta_{Na}} \ln \frac{a_{Ca}^0 N_{Na}}{a_{Na}^0 N_{Ca}} \tag{2}$$

$$\sigma_0 = \mathrm{sgn}(\varphi_0) \sqrt{\frac{\varepsilon RT}{2\pi} \left(a_{Na}^0 e^{\frac{\beta_{Na} F \varphi_0}{RT}} + a_{Ca}^0 e^{\frac{\beta_{Ca} F \varphi_0}{RT}} \right)} \tag{3}$$

$$E_0 = \frac{4\pi}{\varepsilon} \sigma_0 \tag{4}$$

$$S = \frac{N_{Na} k}{m a_{Na}^0} e^{\frac{\beta_{Na} F \varphi_0}{2RT}} = \frac{N_{Ca} k}{m a_{Ca}^0} e^{\frac{2\beta_{Ca} F \varphi_0}{RT}} \tag{5}$$

$$N_{SC} = 10^5 \frac{S \sigma_0}{F} \tag{6}$$

其中　$$m = 0.525\,9\ln\left(\frac{c^0_{Na}}{c^0_{Ca}}\right) + 1.992 \quad (7)$$

式中　R——理想气体常数，J/(K·mol)

T——绝对温度，K

F——法拉第常数，取 96 485 C/mol

β_{Na}、β_{Ca}——Na^+、Ca^{2+}的有效电荷系数

a^0_{Na}、a^0_{Ca}——Na^+、Ca^{2+}活度，mol/L

N_{Na}、N_{Ca}——Na^+、Ca^{2+}在土壤中的吸附量，mol/g

ε——水的介电常数，取 8.9×10^{-9} $C^2/(J\cdot dm)$

m——修正系数

c^0_{Na}、c^0_{Ca}——溶液中 Na^+、Ca^{2+}浓度

k——Debye-Huckel 参数，dm^{-1}

1.3.3　土壤颗粒间内力

介观尺度的土壤颗粒间内力包括水合斥力 P_h、静电斥力 P_{ele}、范德华引力 P_{vdw}，净作用力 P_{net} 为三者合力，计算公式[17]为

$$P_h = 3.33\times10^4 e^{-5.76\times10^9 d} \quad (8)$$

$$P_{ele} = \frac{2}{101}RTc_0\left(\cosh\left(\frac{ZF\varphi_{(d/2)}}{RT}\right) - 1\right) \quad (9)$$

$$P_{vdw} = -\frac{A_{eff}}{6\pi d^3}\times10^{22} \quad (10)$$

$$P_{net} = P_{ele} + P_h + P_{vdw} \quad (11)$$

式中　d——相邻土壤颗粒间距，nm

c_0——电解质浓度，取 1 mol/L

Z——阳离子化合价，$Z^+_{Na} = 1$

$\varphi_{(d/2)}$——两个相邻颗粒双电层重叠位置中点的电位，测定方法参考文献[17]，V

A_{eff}——Hamaker 常数，J，通过露点水势仪测定土水势与土壤含水率拟合得到[18]

1.3.4　土壤团聚体

土壤团聚体粒级分布采用经典干筛法、湿筛法[19]测定。具体步骤如下：

(1)干筛法：选取 500 g 原状风干土样，通过孔径为 2、0.25、0.05 mm 套筛，分别称量计算各级干筛团聚体占土样总量的百分比。

(2)湿筛法：将干筛处理后的 4 级土样配制成 50 g 混合土样，放置在孔径为 2、1、0.5、0.25 mm 的套筛中，将套筛缓慢浸入水中静置 10 min，使团聚体充分湿润。使用 FT-3 型土壤团粒分析仪以频率 30 次/min、振幅 3 cm 振荡筛组 30 min。振荡结束后，将各级筛子上残留的团聚体分别冲洗至已知质量的铝盒中，在 60℃下烘干至恒质量并称量，计算各级水稳性团聚体的质量分数。

土壤团聚体稳定性采用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、大团聚体含量($R_{0.25}$)、分形维数(D)、团聚体破坏率(PAD)与稳定率(WSAR)6 项指标表征[20-23]。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2019 进行数据统计。采用 IBM SPSS Statistics 26 进行统计检验，包括单因素方差分析和双因素方差分析。单因素方差分析用于特定分组下的均值比较，双因素方差分析用于检验处理、土层及其交互作用的显著性。随后用 Duncan 多重比较法进行显著性差异检验(显著性水平 $P<0.05$；*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 概率水平下差异显著，ns 表示无显著差异)。利用 Origin 2022 进行作图。使用 R 软件中的“plspm”包建立偏最小二乘路径模型。

2　结果与分析

2.1　根域水肥调控对土壤贮水量的影响

图 2 为土壤 0~180 cm 深度的贮水量变化，从图中可看出，根域微集水及有机物料对果树 2、3、4、5、7、10 月份 0~180 cm 土层贮水量均有显著影响($P<0.05$，图中不同小写字母代表处理间差异显著)。与 CK 相比，T1、M1 和 M2 处理在不同月份均提高了土壤贮水量，其中 M2 的效果最为突出，各月份测定值均为最高(提升幅度介于 8.78%~34.01%)，说明集雨措施及有机物料添加均可提升土壤贮水量，且施加的有机物料越多，土壤贮水量提升越明显。各处理贮水量在 4—5 月达到最大值，这是由于此时果树处于生长初期，耗水量较少，且降雨量较大。6—8 月降雨量逐月增加，但土壤贮水量持续下降，在 8 月达到最小值，这是由于果树进入关键需水期，蒸散发作用强烈，降雨不足以补充果树耗水。9—10 月果树进入成熟期，耗水减少，贮水量逐渐上升。尽管生育期内降雨量波动较大，但根域微集水与有机物料添加均能提高 0~180 cm 土层贮水

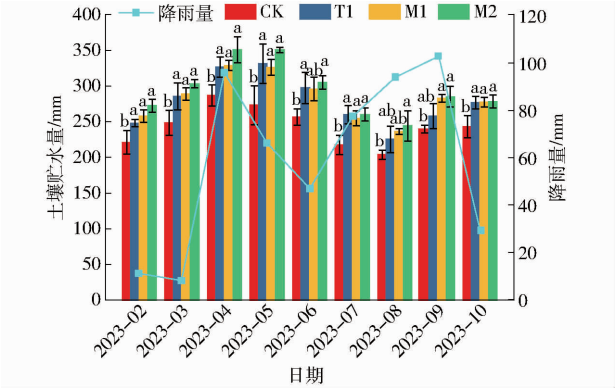


图 2　土壤 0~180 cm 深度贮水量变化

Fig. 2　Variation of soil water storage in 0~180 cm soil layer

量。这主要由于根域微集水及其与有机物料添加相结合通过改变微地形有效集雨,增加水分入渗,有机物料通过改良团粒结构提升土壤持水能力。这些措施共同削弱了降雨波动的影响,增强了土壤水分的有效性和贮水量。

2.2 根域水肥调控对土壤颗粒表面电化学性质的影响

土壤胶体颗粒携带的表面电荷是土壤理化性质的基础,对各种养分离子具有吸持作用,可增大土壤胶体的缓冲性能,能够较好反映土壤的保肥能力和缓冲能力[24]。不同处理土壤表面电化学指标研究结果见表 2。

表 2 不同处理下土壤颗粒的电化学指标

Tab. 2 Electrochemical indexes of soil particles under different treatments

处理	表面电荷数量/(cmol·kg^{-1})	表面电荷密度/(c·m^{-2})	表面电场强度/(GV·m^{-1})	比表面积/(m^2·g^{-1})	表面电位/mV
CK	(5.775 ± 0.90)^a	(0.253 ± 0.12)^b	(3.570 8 ± 0.118)^d	(8.438 ± 0.01)^b	(−0.088 ± 0.01)^a
T1	(6.530 ± 0.16)^a	(0.556 ± 0.01)^b	(7.844 9 ± 0.381)^c	(13.088 ± 2.40)^b	(−0.104 ± 0.01)^a
M1	(6.268 ± 0.22)^a	(1.717 ± 0.57)^a	(24.230 5 ± 0.326)^a	(10.325 ± 3.77)^b	(−0.117 ± 0.03)^a
M2	(6.595 ± 0.01)^a	(0.754 ± 0.00)^b	(10.641 8 ± 0.024)^b	(23.853 ± 3.18)^a	(−0.112 ± 0.00)^a

注:数据表示为平均值 ± 标准差(n = 3),标准差数据保留两位小数,0.00 表示标准差小于 0.005。同列数据后不同小写字母 a、b、c 表示处理间在 0.05 水平下差异显著。下同。

各处理土壤表面电荷数量变化范围为 5.775 ~ 6.595 cmol/kg,根域微集水及有机物料的添加均不同程度增加了土壤表面电荷数量,相比于 CK 分别提高 13.1%、8.5%、14.2%。土壤表面电荷密度是单位土壤胶体表面积上的电荷数量,与 CK 相比,T1、M1、M2 处理的表面电荷密度均有不同程度增加,分别是 CK 处理的 2.2、6.8、3.0 倍,其中 M1 处理增加显著(F(3,5) = 12.820, P < 0.05)。有研究表明,电场力可以极大提高离子的扩散与吸附速率,表面电场对胶体颗粒表面的离子扩散与吸附有较大的影响[25],研究区土壤表面电场强度在 3.570 8 × 10^9 ~ 2.423 05 × 10^{10} V/m 变化,相比 CK,不同处理均显著增加了表面电场强度(F(3,5) = 3 184.625, P < 0.05),其中 M1 处理的效果最为突出,其电场强度是 CK 的 6.8 倍。比表面积为阳离子交换量与表面电荷密度的比值,它与土壤的养分和水分供给能力密切相关[13],本研究不同处理的比表面积相比 CK 均有不同程度增加,其中 M2 处理增加显著(F(3,5) = 15.459, P < 0.05),相比于 CK 提高了 1.8 倍。

2.3 根域水肥调控对土壤 Hamaker 常数及内力分布的影响

在研究土壤颗粒相互作用中,土壤颗粒的 Hamaker 常数是表征范德华引力的一个重要参数[26],为了定量分析土壤颗粒间的范德华引力,根据 Tuller 等[18]的方法,得到不同处理下土壤质量含水率与基质势的拟合曲线(图 3a),得出 CK、T1、M1 和 M2 处理下的 Hamaker 常数分别为 5.94 × 10^{-20}、2.60 × 10^{-19}、5.75 × 10^{-19}、1.13 × 10^{-18} J,各处理均增加了土壤 Hamaker 常数,从而增加了范德华引力(图 3b,图中负号代表方向),且随着有机物料的增加效果增强。与 CK 相比,T1、M1 和 M2 处理下 2 nm 处范德华引力分别增加了 13.30、34.23、70.95 atm,各处理范德华引力在 0 ~ 5 nm 急剧下降,后缓慢趋近于零,在 20 nm 处分别降为 0.004、0.017、0.038、0.075 atm。图 3c 显示,CK、T1、M1、M2 处理在 0.5 nm 处的静电斥力分别为 0.41、26.34、48.15、165.75 atm,T1、M1、M2 处理静电斥力在 0 ~ 8 nm 急剧下降,后逐渐趋于零,分别在 17、18、20 nm 处降为零,根域微集水及有机物料添加均增加了土壤静电斥力,但增加速率小于范德华引力。水合斥力不受集雨措施及有机物料添加的影响,该部分数据未给出。净作用力为三者合力(图 3d),图中正值代表排斥力,负值代表吸引力,当颗粒间距小于 1 nm 时,CK 与 T1 处理的净作用力急剧下降;颗粒间距小于 3 nm 时,M1 与 M2 处理的净作用力急剧下降;颗粒间距大于 4 nm 时,各处理净作用力随距离的变化趋于稳定,逐渐趋向于零;在 18 nm 处,CK、T1、M1 和 M2 处理的净作用力分别下降为 0.005、0.024、0.052、0.090 atm。

2.4 根域水肥调控对团聚体及其稳定性与分形特征的影响

良好的土壤团聚体对调节土壤性质、维持土壤肥力和生态环境功能具有重要作用,不仅有利于水肥高效利用和作物生长,还有利于增强土壤抗侵蚀和固碳能力[27]。由图 4a 可知,处理、土层及其交互作用均对团聚体粒径分布有显著影响。土壤机械稳定性团聚体以粒径大于 2 mm 为主,CK、T1、M1、M2 处理中,其 0 ~ 60 cm 土层平均占比分别为 46.73%、55.06%、59.03%、62.31%,从大到小依次为 M2、M1、T1、CK;粒径小于 0.05 mm 的团聚体占比最小,均值分别为 4.29%、1.23%、1.33%、0.81%,从小到大依次为 M2、T1、M1、CK。各处理均增加了 0 ~ 60 cm 土层粒径大于 2 mm 粒级团聚体含量,20 ~

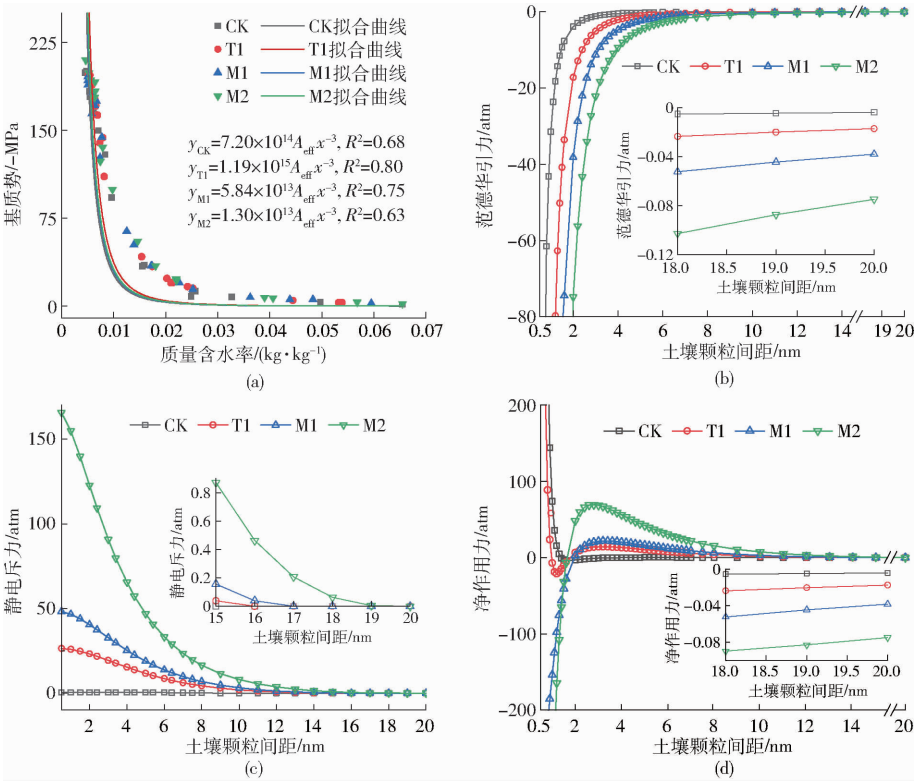
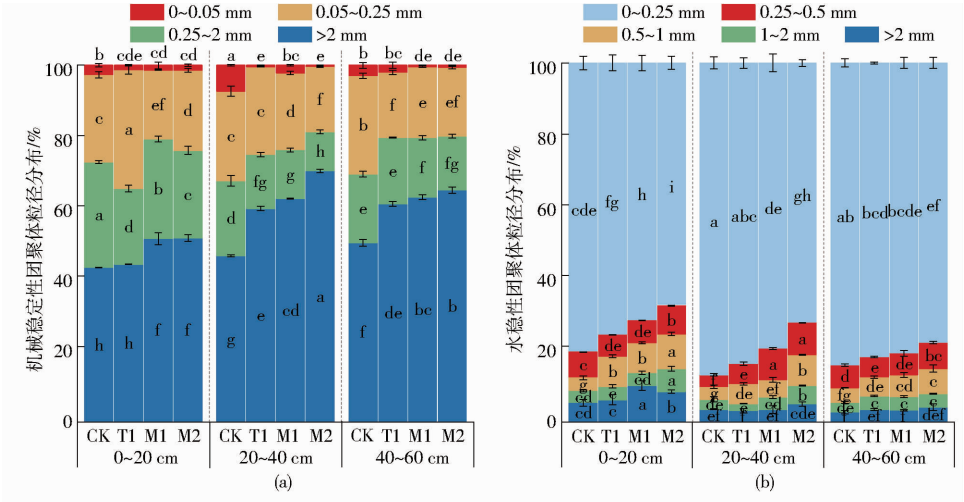


图 3　含水率与基质势拟合曲线及土壤颗粒间内作用力分布

Fig. 3　Fitting curves of water content and matric potential and distribution of interparticle internal forces in soil



机械稳定性团聚体					水稳性团聚体				
	>2 mm	0.25~2 mm	0.05~0.25 mm	0~0.05 mm	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0~0.25 mm
处理	***	***	***	***	***	***	***	***	***
土层	***	***	***	***	***	***	***	*	***
处理×土层	***	***	***	***	***	***	***	***	*

(c)

图 4　机械稳定性与水稳性团聚体粒径分布

Fig. 4　Particle size distribution of mechanically stable and water-stable aggregates

60 cm 土层增加显著($P<0.05$)，说明根域微集水及有机物料添加可增加土壤的大团聚体含量。水稳性团聚体以粒径小于 0.25 mm 为主(图 4b)，且随土层深度的增加而增加，各处理在不同深度上从小到大依次为 M2、M1、T1、CK。粒径大于 2 mm 的水稳性团聚体含量随着土层深度的增加而减少，相比于 CK，M1 和 M2 处理均显著提高了该粒径水稳性团聚体在 0 ~ 20 cm 土层的分布($P<0.05$)。

团聚体稳定性是评价土壤结构和肥力的重要指标，受土壤内部作用力和颗粒表面性质的影响很大。本研究通过平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD、大团聚体含量、分形维数、团聚体破坏率与稳定率表征团聚体的稳定性。机械稳定性团聚体 MWD、GMD、粒径大于 0.25 mm 的大团聚体含量

$DR_{0.25}$如表 3 所示,处理方式、土层深度及其交互作用均显著影响机械稳定性团聚体 MWD、GMD 和 $DR_{0.25}$,在 0 ~ 20 cm 土层,M1 和 M2 处理的 MWD($F(11,24)=442.474$, $P<0.05$)和 GMD($F(11,24)=292.069$, $P<0.05$)均显著高于 CK 和 T1,稳定性更好。M1 的分形维数最小,表明其结构最简单。在 20 ~ 40 cm 土层,M2 的 MWD、GMD 和 $DR_{0.25}$($F(11,24)=235.583$, $P<0.05$)分别显著高于 CK 42.35%、122.32% 和 20.37%,T1 的分形维数最小,MWD 和 GMD 也较高,整体稳定性较好。M1、M2 处理分别在 0 ~ 20 cm、20 ~ 60 cm 土层表现出最高的 MWD、GMD 和 $DR_{0.25}$,且分形维数较低,表明其团聚体的平均大小和大团聚体比例最大,结构较简单,稳定性最好。T1 处理在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层中表现出较高的 MWD 和 GMD,分形维数较低,表明其团聚体结构较简单,稳定性较好。

土壤水稳性团聚体相关指标如表 4 所示,处理方式、土层深度及其交互作用对水稳性团聚体 MWD、GMD、粒径大于 0.25 mm 的大团聚体含量 $WR_{0.25}$和 D 均有显著影响。M2 处理在所有土层中均表现出最高的 GMD 和 $WR_{0.25}$,且分形维数较低。在 0 ~ 20 cm 土层,M1 的 MWD、GMD 和 $WR_{0.25}$分别

表 3 不同处理土壤机械稳定性团聚体平均重量直径、平均几何直径、$DR_{0.25}$和分形维数

Tab.3 Average weight diameter, mean geometric diameter, $DR_{0.25}$ and fractal dimension of mechanically stable aggregates of different treatments

土层深度/cm	处理	平均重量直径/mm	几何平均直径/mm	粒径大于 0.25 mm 的大团聚体含量/%	分形维数
0 ~ 20	CK	(2.97 ± 0.00)^{i}	(1.28 ± 0.00)^{i}	(72.91 ± 0.41)^{e}	(2.277 ± 0.03)^{b}
	T1	(2.94 ± 0.01)^{i}	(1.15 ± 0.02)^{j}	(65.44 ± 0.99)^{h}	(2.167 ± 0.02)^{cd}
	M1	(3.43 ± 0.09)^{f}	(1.71 ± 0.11)^{g}	(79.31 ± 0.89)^{b}	(2.141 ± 0.14)^{d}
	M2	(3.40 ± 0.04)^{f}	(1.61 ± 0.03)^{h}	(76.14 ± 0.19)^{c}	(2.179 ± 0.03)^{cd}
20 ~ 40	CK	(3.07 ± 0.00)^{h}	(1.12 ± 0.02)^{j}	(67.61 ± 1.24)^{g}	(2.463 ± 0.00)^{a}
	T1	(3.80 ± 0.03)^{e}	(1.84 ± 0.02)^{f}	(74.95 ± 0.00)^{d}	(1.998 ± 0.01)^{e}
	M1	(3.95 ± 0.01)^{cd}	(1.92 ± 0.04)^{e}	(76.29 ± 0.66)^{c}	(2.280 ± 0.01)^{b}
	M2	(4.37 ± 0.02)^{a}	(2.49 ± 0.02)^{a}	(81.38 ± 0.08)^{a}	(2.001 ± 0.03)^{e}
40 ~ 60	CK	(3.27 ± 0.05)^{g}	(1.34 ± 0.04)^{i}	(69.48 ± 0.10)^{f}	(2.311 ± 0.05)^{b}
	T1	(3.91 ± 0.04)^{d}	(2.01 ± 0.07)^{d}	(79.73 ± 0.46)^{b}	(2.247 ± 0.09)^{bc}
	M1	(4.00 ± 0.03)^{c}	(2.13 ± 0.03)^{c}	(79.69 ± 0.21)^{b}	(2.008 ± 0.01)^{e}
	M2	(4.10 ± 0.04)^{b}	(2.21 ± 0.04)^{b}	(80.14 ± 0.33)^{b}	(2.084 ± 0.01)^{de}
显著性	处理	***	***	***	***
	土层	***	***	***	ns
	处理 × 土层	***	***	***	***

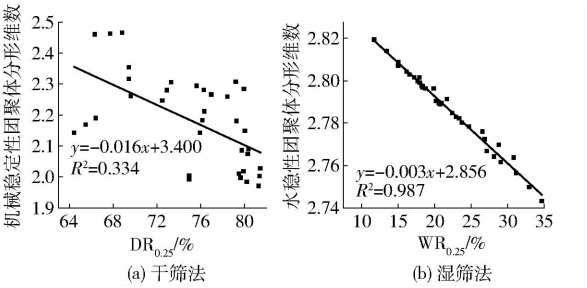
表 4 不同处理土壤水稳性团聚体平均重量直径、平均几何直径、$WR_{0.25}$和分形维数

Tab.4 Average weight diameter, mean geometric diameter, $WR_{0.25}$ and fractal dimension of soil water-stable aggregates under different treatments

土层深度/cm	处理	平均重量直径/mm	几何平均直径/mm	粒径大于 0.25 mm 的大团聚体含量/%	分形维数
0 ~ 20	CK	(0.53 ± 0.06)^{bc}	(0.19 ± 0.01)^{c}	(19.81 ± 1.88)^{de}	(2.796 ± 0.01)^{bc}
	T1	(0.62 ± 0.09)^{b}	(0.22 ± 0.02)^{b}	(24.63 ± 2.24)^{c}	(2.779 ± 0.01)^{e}
	M1	(0.85 ± 0.09)^{a}	(0.25 ± 0.02)^{a}	(28.70 ± 2.13)^{b}	(2.770 ± 0.01)^{f}
	M2	(0.80 ± 0.04)^{a}	(0.27 ± 0.01)^{a}	(32.92 ± 1.76)^{a}	(2.750 ± 0.01)^{g}
20 ~ 40	CK	(0.41 ± 0.02)^{de}	(0.17 ± 0.01)^{d}	(13.38 ± 1.67)^{h}	(2.814 ± 0.01)^{a}
	T1	(0.39 ± 0.04)^{de}	(0.18 ± 0.01)^{d}	(16.49 ± 1.47)^{fg}	(2.803 ± 0.00)^{b}
	M1	(0.43 ± 0.08)^{de}	(0.19 ± 0.01)^{cd}	(20.85 ± 2.53)^{de}	(2.790 ± 0.01)^{cd}
	M2	(0.57 ± 0.04)^{bc}	(0.22 ± 0.01)^{b}	(28.08 ± 0.95)^{b}	(2.764 ± 0.00)^{f}
40 ~ 60	CK	(0.37 ± 0.03)^{e}	(0.17 ± 0.00)^{d}	(16.11 ± 1.09)^{gh}	(2.804 ± 0.00)^{b}
	T1	(0.43 ± 0.01)^{de}	(0.18 ± 0.00)^{cd}	(18.42 ± 0.29)^{efg}	(2.797 ± 0.00)^{bc}
	M1	(0.43 ± 0.00)^{de}	(0.19 ± 0.00)^{cd}	(19.44 ± 1.55)^{def}	(2.793 ± 0.01)^{c}
	M2	(0.49 ± 0.06)^{cd}	(0.20 ± 0.01)^{c}	(22.44 ± 1.53)^{cd}	(2.784 ± 0.00)^{de}
显著性	处理	***	***	***	***
	土层	***	***	***	***
	处理 × 土层	***	***	*	**

比 CK 高 60.4%、31.6% 和 44.9%。M2 的 MWD、GMD 和 $WR_{0.25}$ 在 20 ~ 40 cm 土层分别比 CK 高 39.0%、29.4% 和 109.9%，在 40 ~ 60 cm 土层分别比 CK 高 32.4%、17.6% 和 39.3%。T1、M1 和 M2 处理的分形维数在 0 ~ 60 cm 土层均低于 CK，且在 0 ~ 40 cm 土层变化显著（$F(11,24) = 40.067$，$P < 0.05$）。以上结果表明，不同处理对土壤团聚体的机械稳定性和水稳性均有影响，M2 处理的效果尤为突出，机械稳定性 MWD、GMD 分别提升了 14.48% ~ 42.35%、25.78% ~ 122.32%，水稳性 MWD、GMD 分别提升了 32.43% ~ 50.94%、17.65% ~ 42.11%。

通过对土壤团聚体分形维数与粒径大于 0.25 mm 团聚体含量间相关性分析可知（图 5），土壤团聚体分形维数均随着 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 的增大而减小，与 $WR_{0.25}$ 呈显著负相关关系（$P < 0.05$），干筛法、湿筛法 R^2 分别为 0.334 和 0.987，水稳性团聚体分形维数与 $WR_{0.25}$ 线性关系良好，说明根域微集水及有机物料添加通过增加粒径大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量，改善了土壤结构，防止土壤板结。



(a) 干筛法　　(b) 湿筛法

图 5　土壤团聚体分形维数与粒径大于 0.25 mm 土壤团聚体含量相关性

Fig. 5　Correlation between fractal dimension of soil aggregate and soil aggregate content greater than 0.25 mm

图 6 为各处理土壤团聚体破坏率（PAD）与稳定率（WSAR）表现趋势。各处理 PAD 随土层深度增大而增大，WSAR 相应减小。与 CK 相比，T1、M1 和 M2 处理 PAD 在 0 ~ 20 cm 土层分别显著降低了 14.3%、12.4% 和 22.0%，WSAR 显著增加了 38.2%、33.1% 和 58.8%。各处理 PAD 和 WSAR 在 40 ~ 60 cm 土层差异不显著，处理间变化趋势与 0 ~ 40 cm 土层一致，根域微集水与有机物料添加均表现出较好的团聚体稳定性。

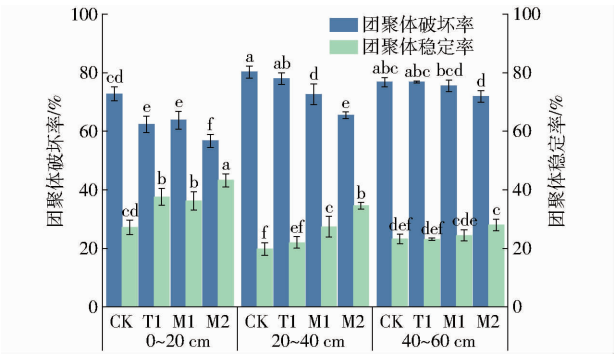


图 6　不同处理土壤团聚体破坏率与稳定率

Fig. 6　PAD and WSAR of soil aggregates under different treatments

3　讨论

3.1　根域微集水与有机物料协同处理对颗粒间相互作用力的影响机制

土壤颗粒间相互作用力包括静电斥力、范德华引力、水合斥力，对土壤团聚体稳定性有重要影响，这些作用力本质上受颗粒表面电荷的影响[28]。本研究通过系统分析发现，根域微集水与有机物料均可影响土壤颗粒间相互作用力，其作用机制主要体现在以下 3 个方面：

（1）水分调控对颗粒间作用力的改善作用。根域微集水可显著提高多数月份的土壤贮水量（图 2），相关性分析（图 7，W 为土壤贮水量；φ_0 为表面电位；σ_0 为表面电荷密度；E_0 为电场强度；S 为比表面积；SCN 为表面电荷数量；$P_{ele}0.5$ 为 0.5 nm 处静电斥力；$P_{vdw}1$ 为 1 nm 处范德华引力；$P_{net}2$ 为 2 nm 处净作用力；$DR_{0.25}$、$WR_{0.25}$ 为机械稳定性、水稳性大团聚体含量；PAD 为团聚体破坏率；DMWD、WMWD 为机械稳定性、水稳性团聚体平均重量直径；DGMD、WGMD 为机械稳定性、水稳性团聚体几何平均直径；DD、WD 为机械稳定性、水稳性团聚体分形维数）显示，土壤贮水量与 0.5 nm 处静电斥力（$r = 0.67$）、1 nm 处范德华引力（$r = 0.70$）和 2 nm 处净作用力（$r = 0.63$）呈显著正相关。偏最小二乘路径模型（图 8，观测指标与潜变量间箭头表示构成关系，数据为权重系数；潜变量及土壤贮水量与根域微集水、有机物料间实线表示正向影响，虚线表示负向影响，箭头上的数据为路径系数，线宽与路径系数成正比；GOF 为 0.84，* 表示 $P < 0.05$，** 表示 $P < 0.01$，*** 表示 $P < 0.001$）显示，根域微集水对颗粒间作用力有显著正向影响（路径系数 0.298 8），这可能是由于根域微集水通过增加土壤水分，改变了土壤中的离子浓度，同时促进胶体颗粒表面官能团的解离，从而影响颗粒间作用力[14]。

（2）有机物料对颗粒间作用力的改良效应。偏最小二乘路径模型（图 8）证实，有机物料的添加对颗粒间作用力有显著的正向影响（路径系数 0.966 4），这是因为有机物料中的有机质具有较大的比表面积，为阳离子交换提供了更多活性位点，且有机质分解产生的腐殖质含有丰富的羧基（—COOH）和羟基（—OH）等官能团，通过解离 H^+ 使土壤表面带负电荷[29-30]，这种“比表面积扩大-负电荷增加”的协同

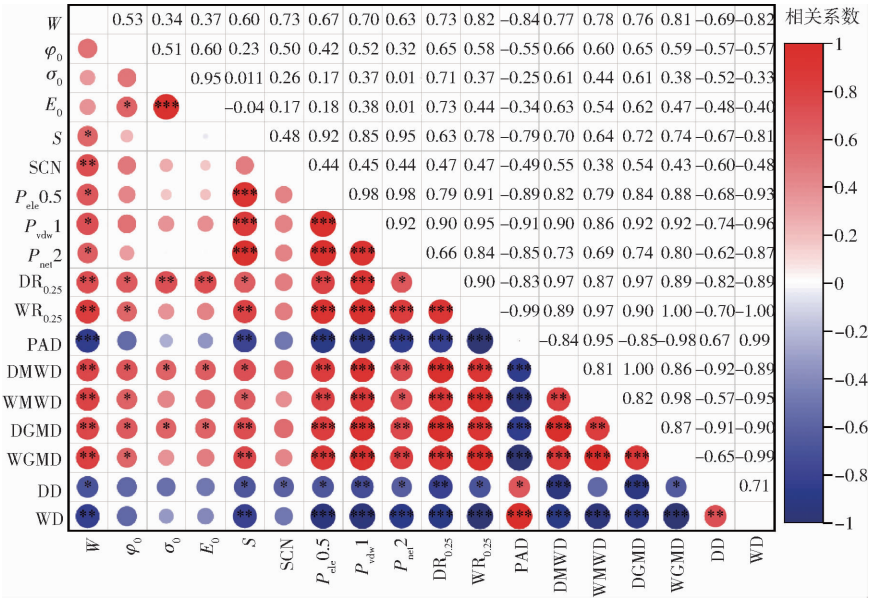


图 7 土壤贮水量、电化学指标与团聚体稳定性的 Pearson 相关性分析

Fig. 7 Pearson correlation analysis between soil water storage, electrochemical parameters, and aggregate stability

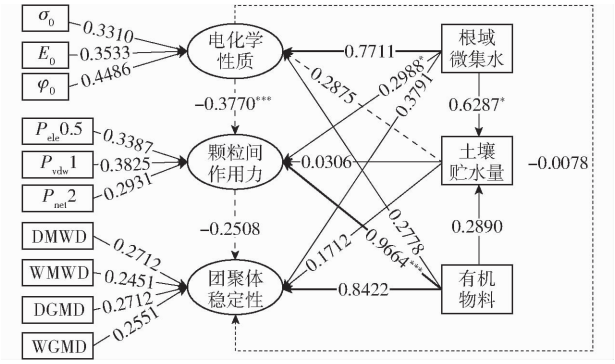


图 8 偏最小二乘路径图

Fig. 8 Partial least squares path diagram

效应,使得 M1、M2 处理的电场强度较 CK 提升了 5.8 倍和 2.0 倍。同时有机质输入使 Hamaker 常数从 5.94×10^{-20} J(CK)提升至 5.75×10^{-19} J(M1)和 1.13×10^{-18} J(M2)。电场强度和 Hamaker 常数的变化有效调控了静电斥力和范德华引力,使颗粒间净作用力发生变化[14, 31]。

(3)电化学性质对颗粒间作用力的调控机制。图 7、8 揭示了电化学性质与内力场的定量关系,颗粒间作用力 $P_{ele}0.5$、$P_{vdw}1$、$P_{net}2$ 与比表面积 S 极显著正相关,相关性系数分别为 0.92、0.85、0.95,且电化学性质 σ_0、E_0、φ_0 对颗粒间作用力有显著的负向影响(路径系数 −0.377 0),表明电化学性质是影响颗粒间作用力的主要因素,与刘婧芳[14]的研究结果一致。

值得注意的是,本研究观察到中量有机物料处理(M1)在部分指标(如表面电荷数量、比表面积)上的提升幅度反而低于仅进行根域微集水的处理(T1),这表明有机物料的改良效应并非简单的剂量递增关系,其内在机制可能更为复杂。激发效应可能是其关键因素之一,中量(28.0 kg/棵)有机物料的输入,为土壤微生物提供了充足的易分解能源,可能激发了微生物群落对原有土壤有机质的加速分解[32],导致短期内土壤胶体部分活性位点或胶结物质的净增长量不及预期。其次,有机物料在腐解过程中会消耗一定的土壤水分,在干旱半干旱地区,这可能与果树生长产生轻微的水分竞争,部分抵消了微集水带来的水分增益效应。

偏最小二乘路径模型揭示了根域微集水与有机物料协同调控团聚体稳定性的路径,其核心在于通过改变土壤物理化学环境,驱动颗粒表面电化学性质演变,最终调控颗粒间内作用力的平衡。但模型中的关系是基于特定田间试验条件建立的,其普适性需在不同土壤和环境条件下进一步验证。

3.2 土壤水肥调控对团聚体稳定性的多尺度作用机制

土壤团聚体稳定性作为评价土壤结构质量的核心指标,其形成与维持是一个跨越宏观、介观与微观尺度的复杂过程。本研究通过系统分析团聚体稳定性指标(DMWD、WMWD、DGMD、WGMD)与各影响因素的关系,揭示了“电化学性质-颗粒内力-团聚体稳定性”的级联调控机制(图 8)。

在微观尺度上,电化学性质的改变直接决定了颗粒间作用力的平衡。相比于电化学性质对团聚体稳定性的直接影响,电化学-内力-团聚体的路径系数更加显著,电化学性质对颗粒间作用力(路径系数 −0.377 0)及颗粒间作用力对团聚体稳定性(路

径系数 -0.250 8）均有负向影响。有研究表明，土壤颗粒的表面电化学性质是调控其内作用力的关键因素：静电斥力主要由表面电场强度决定，而范德华引力则与颗粒间距和比表面积密切相关[14]，而这些作用力直接影响土壤团聚体的稳定性，例如范德华引力抑制团聚体分散，静电斥力决定团聚体的破碎程度[33-34]。本研究路径分析结果表明，电化学性质通过调控颗粒间作用力（静电斥力与范德华引力的动态平衡）来影响团聚体稳定性，具体体现在：有机物料（特别是 M1 处理）极大地提升了土壤表面电荷密度和电场强度（表 2），这一微观变化，直接调控了介观尺度的核心过程——颗粒间作用力的平衡。净作用力正是斥力与引力动态平衡的结果，如图 3d 所示，高量有机处理（M2）使净作用力在 0 ~ 1.6 nm 的关键间距内表现为净吸引力，这种介观尺度引力的增强，是促使土壤颗粒克服斥力、稳定结合形成微团聚体的直接物理原因。这一机制与前人研究结果具有一致性。

在宏观尺度上，具体表现为团聚体稳定性的提升。M2 处理在 0 ~ 60 cm 土层的机械稳定性平均重量直径（3.96 mm）、几何平均直径（2.10 mm）、大团聚体含量较 CK 分别提高 27.74%、68.45%、13.17%，分形维数 D 降至 2.088，较 CK 降低 11.16%。这种改善主要源于两个协同机制：水分调控方面，集雨措施使土壤贮水量提高（图 2），不仅直接缓解了旱季水分胁迫，还通过促进微生物活动和根系分泌（如多糖类物质），为团聚体形成提供了生物胶结剂[35-37]；有机输入方面，高量有机物料（44.0 kg/棵）增加了土壤有机碳含量，其分解产物既作为胶结核心，又通过疏水作用增强团聚体抗崩解能力[37]。周旭姣等[38]的秸秆炭覆盖垄沟集雨种植试验也证实，这种水分-有机质协同模式能够提升团聚体稳定性。此外，张忠学等[39]发现，水土保持组合耕作可同步提高土壤体积含水率以及团聚体平均重量直径、几何平均直径和大团聚体含量，表明水土保持措施能够同步改善土壤蓄水能力与结构稳定性。杨永辉等[40]进一步指出，长期增施有机肥可显著提高水稳性大团聚体含量、土壤有机碳含量和饱和导水率，并增强降水在土壤中的蓄、保、用能力。上述研究分别从水分调控和有机投入角度佐证了本研究 M2 处理对土壤贮水与团聚体稳定性的协同改善作用。

综合上述分析，团聚体稳定性的维持本质上是一个多尺度协同调控的过程：根域微集水与有机物料通过提升土壤水分含量与有机质水平以改善土壤环境，进而改变了胶体表面的电荷密度、电场强度与比表面积等电化学性质（微观），进一步调控了静电斥力与范德华引力的强度与作用范围（介观），最终决定了团聚体的机械稳定性与水稳性（宏观）。这种“电化学性质-颗粒内力-团聚体稳定性”的多尺度级联作用机制解释了农业管理措施（集雨与有机输入）改善土壤结构的科学原理，为旱地农业的可持续管理提供了理论依据。同时应当认识到，本研究的机理解释主要建立在不足两年田间试验的基础上，有机物料的长期分解与腐殖化过程及其对电化学性质的持续影响，仍需更长时间的监测来验证其长期效应。此外，土壤微生物作为连接有机物料分解与胶结物形成的关键生物因子，其在“水-肥-土”耦合系统中的作用未被深入探讨。未来的研究可将微生物群落结构与功能纳入这一多尺度框架，从而更全面地解析团聚体稳定的生物物理化学耦合机制。

4　结束语

本研究表明，根域微集水-有机物料协同技术能有效改良黄土高原果园土壤。其作用机制在于：通过提升土壤贮水量并优化胶体表面电化学性质，增强了颗粒间的净吸引力（体现为 0 ~ 1.6 nm 关键间距内净作用力由斥力转引力），进而提升了土壤大团聚体的含量与稳定性。这一发现揭示了“电化学性质-颗粒内力-团聚体稳定性”的多尺度级联调控机制，为该地区果园水肥胁迫的缓解提供了重要的理论支持与技术方案。

参　考　文　献

[1] 朱德兰，王文娥，楚杰. 黄土高原丘陵区红富士苹果水肥耦合效应研究[J]. 干旱地区农业研究，2004(1)：152 - 155.
Zhu Delan, Wang Wene, Chu Jie. Study on the coupling effect of water and fertilizer on apple in hilly area of Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004(1): 152 - 155. (in Chinese)

[2] 赵西宁，刘帅，高晓东，等. 不同改良剂对黄土高原丘陵区山地果园土壤质量的影响[J]. 生态学报，2022,42(17)：7080 - 7091.
Zhao Xining, Liu Shuai, Gao Xiaodong, et al. Effect evaluation of soil amendments on soil quality of mountain apple orchards in the hilly region of Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(17): 7080 - 7091. (in Chinese)

[3] 郑利剑，马娟娟，郭飞，等. 蓄水坑灌下矮砧苹果园水分监测点位置研究[J]. 农业机械学报，2015,46(10)：160 - 166.
Zheng Lijian, Ma Juanjuan, Guo Fei, et al. Monitoring locations of soil water content in water storage pit irrigated dwarfing

apple tree orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 160 - 166. (in Chinese)

[4] 宋小林, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 121 - 128.
Song Xiaolin, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Distribution characteristic of soil moisture and roots in rain-fed old apple orchards with water-fertilizer pit on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 121 - 128. (in Chinese)

[5] 张彬彬. 有机无机肥配施结合集雨措施对山地果园理化性质及苹果产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Zhang Binbin. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers and rainwater collection measures on physical and chemical properties and apple yield in mountain orchards[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)

[6] 王小赟, 王琦, 周旭姣, 等. 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿根芽、干草产量和水分利用效率的影响[J]. 草原与草坪, 2023, 43(3): 1 - 13.
Wang Xiaoyun, Wang Qi, Zhou Xujiao, et al. Effects of ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application on root buds, fodder yield and water use efficiency of alfalfa[J]. Grassland and Turf, 2023, 43(3): 1 - 13. (in Chinese)

[7] 张彬彬, 吴淑芳, 冯浩, 等. 有机材料结合集雨措施对山地果园理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 241 - 247.
Zhang Binbin, Wu Shufang, Feng Hao, et al. Effects of organic materials combined with rainwater collection measures on soil physicochemical properties of mountain apple orchards[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 241 - 247. (in Chinese)

[8] Panigrahi P, Srivastava A K, Panda D K, et al. Rainwater, soil and nutrients conservation for improving productivity of citrus orchards in a drought prone region[J]. Agricultural Water Management, 2017, 185: 65 - 77.

[9] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 627 - 643.
Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 627 - 643. (in Chinese)

[10] Hu F N, Liu J F, Xu C Y, et al. Soil internal forces initiate aggregate breakdown and splash erosion[J]. Geoderma, 2018, 320: 43 - 51.

[11] Hu F N, Xu C Y, Ma R T, et al. Biochar application driven change in soil internal forces improves aggregate stability: based on a two-year field study[J]. Geoderma, 2021, 403: 115276.

[12] Wang Q, Wen J, Wen Y J, et al. Alteration of soil-surface electrochemical properties by organic fertilization to reduce dissolved inorganic nitrogen leaching in paddy fields[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 209: 104956.

[13] Xie J, Huang R, Wu D X, et al. Soil organic matter and amorphous oxides determine the surface electrochemical properties of purple soil under long-term inorganic and organic fertilization[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(3): 5789 - 5798.

[14] 刘婧芳. 土壤内力对黄土区主要土壤团聚体稳定性及溅蚀的影响机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Liu Jingfang. The effects of soil internal forces on aggregate stability and splash erosion of main soils in Loess region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[15] 李斌. 根域条状微集水改土技术对陕北果园土壤改良效应及苹果生产的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
Li Bin. Effects of root-zone strip micro-catchment and soil amendment technology on the effect of soil amendment and apple production in northern Shaanxi orchards [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)

[16] Li H, Hou J, Liu X M, et al. Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6): 2128 - 2135.

[17] Li S, Li H, Xu C Y, et al. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5): 1563 - 1571.

[18] Tuller M, Or D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents[J]. Water Resources Research, 2005, 41(9): W09403.

[19] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28(5): 337 - 351.

[20] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993(20): 1896 - 1899.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Soil fractal characteristics characterized by particle size weight distribution [J]. Chinese Science Bulletin, 1993(20): 1896 - 1899. (in Chinese)

[21] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, 99(1 - 2): 123 - 145.

[22] Zhu X A, Liu W J, Yuan X, et al. Aggregate stability and size distribution regulate rainsplash erosion: evidence from a humid tropical soil under different land-use regimes[J]. Geoderma, 2022, 420: 115880.

[23] Bai Y X, Zhou Y C, He H Z. Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China[J]. Geoderma, 2020, 376: 114548.

[24] 邹献中, 赵安珍, 季国亮. 可变电荷土壤吸附铜离子时氢离子的释放[J]. 土壤学报, 2002(3): 308 - 317.
Zou Xianzhong, Zhao Anzhen, Ji Guoliang. Release of hydrogen ions during adsorption of copper ions by variable charge soils

[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002(3): 308 - 317. (in Chinese)

[25] 刘艳丽，李航. 腐殖质胶体表面电场力作用下 Zn^{2+} 的吸附动力学研究[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2010,32(3)：77 - 81.
Liu Yanli, Li Hang. Effect of electrostatic field originating from charged humic surface on the adsorption kinetics of Zn^{2+} [J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2010,32(3): 77 - 81. (in Chinese)

[26] 郭霞. 动态光散射技术测定土壤胶体 Hamaker 常数的研究[D]. 重庆：西南大学，2016.
Guo Xia. Dynamic light scattering technology determination the Hamaker constant of soil colloids[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. (in Chinese)

[27] Liu Z, Zhang Y, Sun Y Y, et al. Interaction force mechanism for the improvement of reclaimed soil aggregate stability in abandoned homestead by different organic-inorganic soil conditioners[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1207887.

[28] 马任甜. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体稳定性提升的内力作用机制[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2021.
Ma Rentian. Internal forces mechanism of soil aggregate stability improvement during vegetation restoration on the Ziwuling mountain, China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[29] Liu J F, Wang Z L, Hu F N, et al. Soil organic matter and silt contents determine soil particle surface electrochemical properties across a long-term natural restoration grassland[J]. Catena, 2020,190: 104526.

[30] 赵楚，盛茂银，李雨萱，等. 喀斯特生态系统土壤表面电化学特征及其影响因子[J]. 土壤学报，2022,59(3)：756 - 766.
Zhao Chu, Sheng Maoyin, Li Yuxuan, et al. Characteristics of soil electrochemical properties and soil environmental impact factors in Karst ecosystem in south west China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022,59(3): 756 - 766. (in Chinese)

[31] Yu Z H, Zhang J B, Zhang C Z, et al. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability[J]. Soil & Tillage Research, 2017,174: 251 - 260.

[32] Feng J G, Zhu B. Global patterns and associated drivers of priming effect in response to nutrient addition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2021,153: 108118.

[33] Liu Z, Zhou L, Zhang Y, et al. Internal force mechanism of pisha sandstone as a soil amendment to improve sandy soil structural stability in Mu Us Sandy Land[J]. Sustainability, 2024,16(11): 4415.

[34] Xu C Y, Yu Z H, Li H. The coupling effects of electric field and clay mineralogy on clay aggregate stability[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015,15(5): 1159 - 1168.

[35] 段晓明，夏栋，马悦阳，等. 不同生态修复方式对土壤团聚体稳定性及胶结物质的影响[J]. 生态学报，2025(11)：1 - 13.
Duan Xiaoming, Xia Dong, Ma Yueyang, et al. Effect of different restoration approaches of engineering disturbance slopes on bonding materials and stability of soil aggregate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025(11): 1 - 13. (in Chinese)

[36] Steiner C, Das K C, Garcia M, et al. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol[J]. Pedobiologia, 2008,51(5 - 6): 359 - 366.

[37] 谭文峰，许运，史志华，等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. 土壤学报，2023,60(5)：1297 - 1308.
Tan Wenfeng, Xu Yun, Shi Zhihua, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(5): 1297 - 1308. (in Chinese)

[38] 周旭姣，张晓娟，吕陇，等. 秸秆炭覆盖垄沟集雨种植对土壤结构和紫花苜蓿产量的影响[J]. 草原与草坪，2023,43(6)：81 - 93.
Zhou Xujiao, Zhang Xiaojuan, Lv Long, et al. Effects of ridge-furrow rainwater harvesting with maize straw biochar application on soil structure and alfalfa fodder yield in semi-arid regions of China[J]. Grassland and Turf, 2023,43(6): 81 - 93. (in Chinese)

[39] 张忠学，尹致皓，余佩哲，等. 黑土区坡耕地水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响[J]. 农业机械学报，2024,55(1)：282 - 293.
Zhang Zhongxue, Yin Zhihao, Yu Peizhe, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil physical and chemical properties in slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 282 - 293. (in Chinese)

[40] 杨永辉，邬佳宾，高翠民，等. 长期增施有机肥对氢氧同位素分布与小麦水分利用的影响[J]. 农业机械学报，2025,56(12)：707 - 716.
Yang Yonghui, Wu Jiabin, Gao Cuimin, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on hydrogen and oxygen isotopic distribution and wheat water utilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 707 - 716. (in Chinese)