

DOI: 10.11686/cyxb2025237

<http://cyxb.magtech.com.cn>

刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 黄土高原典型草本植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响. 草业学报, 2026, 35(7): 80—91.

LIU Jun-yang, ZHOU Zheng-chao, SU Xue-meng. Effects of typical herbaceous plant roots on electrochemical properties of the soil colloid surface on the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(7): 80—91.

黄土高原典型草本植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响

刘均阳¹, 周正朝^{2*}, 苏雪萌³

(1. 延安大学生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119; 3. 陕西理工大学人文学院, 陕西 汉中 723001)

摘要: 植物根系对土壤胶体表面电化学性质有显著影响。为量化植物根系与土壤胶体表面电化学性质的响应关系, 本试验以黄土高原3个不同采样区(神木、安塞和永寿)的典型草本植物为研究对象, 对根系形态参数和土壤胶体表面电化学性质进行了测定和分析。结果表明: 研究区不同样地土壤表面电场、表面电势、表面电荷数量、比表面积和表面电荷密度的变化范围分别是 $1.23 \times 10^8 \sim 28.46 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $-149.91 \sim -81.33 \text{ mV}$ 、 $7.26 \sim 24.34 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $8.32 \sim 147.38 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.09 \sim 2.02 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。根系形态参数(根长密度、根表面积密度和根体积密度)与土壤胶体表面电化学性质显著相关($P < 0.05$, $P < 0.01$), 并且 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级的细根是影响土壤胶体表面电化学性质的关键。根表面积密度与土壤表面电场、表面电势和表面电荷密度指数函数负相关, 与土壤比表面积和表面电荷数量指数函数正相关($R^2 = 0.35 \sim 0.67$, $P < 0.01$)。植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响以间接方式为主, 主要通过改变土壤理化性质来实现。此外, 由于不同采样区植物根系的生长以及与土壤互馈机制的差异, 植物根系在神木地区对土壤胶体表面电化学性质的影响最为显著, 其次是安塞和永寿地区。该研究有助于进一步认识植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响, 为土壤功能和退化生态系统的恢复提供基础科学依据。

关键词: 植物根系; 土壤胶体; 表面电化学性质; 黄土高原

Effects of typical herbaceous plant roots on electrochemical properties of the soil colloid surface on the Loess Plateau

LIU Jun-yang¹, ZHOU Zheng-chao^{2*}, SU Xue-meng³

1. School of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an 716000, China; 2. School of Geographical Sciences and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3. College of Humanities, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China

Abstract: Plant roots have a significant effect on the electrochemical properties of the surface of soil colloids. To quantify the response relationship between plant roots and the electrochemical properties of the soil colloid surface, we analyzed and compared soil colloids and roots of typical herbaceous plants from three different sampling areas on the Loess Plateau (Shenmu, Ansai, and Yongshou). The root morphological parameters and electrochemical properties of soil colloids' surface were measured and analyzed. The soil surface electric field, surface potential, surface charge quantity, specific surface area, and surface charge density in different sampling sites in study areas

收稿日期: 2025-06-16; 改回日期: 2025-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(42407478, 42277320), 陕西省杰青项目(2023-JC-JQ-27), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0314)和延安大学博士启动项目(YAU202313804)资助。

作者简介: 刘均阳(1987—), 女, 辽宁营口人, 讲师, 博士。E-mail: jyliu@yau.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zczhou@snnu.edu.cn

ranged from 1.23×10^8 to $28.46 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, from -149.91 to -81.33 mV , from 7.26 to $24.34 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$, from 8.32 to $147.38 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, and from 0.09 to $2.02 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. Root morphological parameters (root length density, root surface area density, and root volume density) were significantly correlated with the electrochemical properties of the soil colloid surface ($P < 0.05$, $P < 0.01$). Fine root ($0 \text{ mm} < \text{diameter} \leq 0.5 \text{ mm}$) was the key factor affecting the electrochemical properties of the soil colloid surface. The root surface area density had exponential negative relationships with soil surface electric field, surface potential, and surface charge density, and exponential positive correlations with soil specific surface area and surface charge quantity ($R^2 = 0.35 - 0.67$, $P < 0.01$). The influence of plant roots on electrochemical properties of the soil colloid surface was mainly indirect, primarily through changes in soil physicochemical properties. Moreover, because of differences in plant root growth and the feedback mechanisms between roots and soil in different sampling areas, the impact of plant roots on electrochemical properties of the soil colloid surface was most significant in Shenmu, followed by Ansai and Yongshou. The findings of this study clarify the impact of root systems on the electrochemical properties of the soil colloid surface and provide a scientific basis for the restoration of soil functions and degraded ecosystems.

Key words: plant roots; soil colloid; surface electrochemical properties; Loess Plateau

土壤胶体(半径小于 $1 \mu\text{m}$ 的土壤颗粒)是土壤中最细小、活跃的固体部分^[1-2],由于其巨大的表面积和特殊的电荷性质,吸附了土壤中 80% 以上的土壤电荷,促进了胶体表面不同电化学性质的形成。土壤表面电场、表面电势、表面电荷密度、比表面积和表面电荷数量是土壤胶体表面重要的电化学性质^[3-4]。研究表明,土壤表面电场是团聚体破碎与运移的主要驱动力,并显著影响土壤微生物活性与水分运动^[3-5];土壤表面电势与土壤溅蚀及径流侵蚀过程密切相关^[6-7];土壤比表面积与表面电荷数量等参数通过影响养分吸附与解吸过程,调控土壤养分有效性及持水能力等^[8-10]。因此,土壤胶体表面电化学性质对土壤养分循环和土壤侵蚀等土壤功能和过程具有深远影响,定量研究土壤胶体表面电化学性质对于深入了解土壤宏观行为、合理利用土地资源等具有重要意义。

植被恢复可为土壤颗粒提供大量可变电荷和阳离子取代位点,驱动土壤胶体表面电化学性质发生相应的变化。陈晶晶^[11]对香根草(*Chrysopogon zizanioides*)和新银合欢(*Leucaena leucocephala*)植物篱作用下的土壤胶体表面电化学性质进行了监测,发现植物篱的生长实现了土壤比表面积的增加,土壤表面电场和表面电荷密度的减少。杨亚楠等^[12]、Liu 等^[13]和 Ali 等^[14]通过试验发现,伴随植被的生长土壤比表面积和表面电荷数量显著增长,土壤表面电场和表面电荷密度显著下降等。植物根系作为植物—土壤互馈的关键部位,必然在上述的土壤演变过程中起着主导作用。植物根系可通过物理缠绕、化学黏结等作用积累土壤细颗粒(黏粒或粉粒);通过分泌质子和有机酸诱导根际土壤 pH 改变;通过分泌和分解等过程增加土壤有机物含量等;进而改变土壤胶体表面电化学性质^[13,15-17]。此外,植物根系还可以直接或间接地吸收、交换土壤中的带电粒子,导致土壤胶体表面电荷性质的变化^[18]。因此,植物根系对土壤胶体表面电化学性质具有显著影响。

黄土高原地区因生态系统脆弱、水土流失严重等问题,成为我国重点建设的生态环境保护区。为修复生态系统,该地区实施了一系列生态保护措施,例如 1999 年开展的“退耕还林(草)”工程。这些措施的实施提升了黄土高原地区的植被覆盖率,进而显著改善了土壤特性,如土壤有机质和含水量增加、土壤容重减少等^[13,19-20]。当然,土壤胶体表面电化学性质也在此过程中发生了显著变化,但相关的量化研究相对较少,特别是植物根系与土壤胶体表面电化学性质的响应研究。此外,植物根系在不同区域环境条件下的形态特征及其对土壤性质的影响机制存在较大差异,因而理论上植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响也存在显著的空间差异。

因此,本试验选择了黄土高原 3 个典型采样区(神木、安塞和永寿),通过对植物根系与土壤胶体表面电化学性质的定量响应分析,明确植物根系对土壤表面电化性质的影响及其空间差异。此结果可加深对黄土高原地区土壤胶体表面电化学性质演化机制的认识,为优化生态修复技术、土壤健康管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国黄土高原地区(面积 64×10^4 km²; 坐标 33.68° — 41.27° N, 107.87° — 114.55° E; 海拔 1000~2000 m)。该地区属于大陆性季风气候。年均降水量 200~700 mm, 70% 以上降水量集中在 7—9 月, 且多以短时暴雨为主。年均温度为 6.6 ~ 14.3° C。土壤以黄土为主, 具有明显的带状分布特征^[12]。植被分布由东南地区的森林草原、典型草原向西北地区的荒漠草原递变, 常见植物有柠条(*Caragana korshinskii*)、狼牙刺(*Sophora davidii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等。随着退耕还林(草)等一系列生态恢复政策的实施, 该地区植被覆盖率显著提高。据调查, 截至 2010 年研究区的土地利用方式以草地为主, 覆盖面积在 41.7% 以上^[21]。

通过野外实地调查, 选取了 3 个具有典型特征的采样区: 从北到南分别为榆林市神木市(砂黄土)、延安市安塞区(黄绵土)和咸阳市永寿县(灰褐土)。研究区中, 须根系草本植物长芒草和直根系草本植物铁杆蒿因其极强的抗旱和繁殖能力, 在该区域分布尤为广泛^[22]。因此本试验选择以长芒草或铁杆蒿为优势种、人为干扰小、地形相对均匀、植物长势良好、植被覆盖度在 75%~80% 的坡面作为试验样地, 同时选择 1 年左右的弃耕地作为对照地。每个采样区的同一样地选择 3 个具有相似海拔、坡度及坡向的坡面作为重复, 具体样地信息见表 1。

1.2 样品采集及处理

2020 年 5—7 月在试验样地内进行取样。根系样品采用边长为 10 cm 的金属方形取样器进行取样。取样时, 先后用剪刀去除植物的冠层部分, 用铁铲清理地表的生物结皮及枯落物, 用皮锤将取样器垂直缓慢砸入土壤。取出样品后, 将取样器中的根土混合物装入清洗网袋, 清洗网袋置于水流中将附着在根系表面的泥土冲走, 洗净的根系取出后置于 4° C 的冰箱中保存; 土壤样品采用长、宽和高分别为 15、10 和 10 cm 的金属饭盒进行取样。取样位置与根系样品的取样位置尽量保持一致。取样后将土壤样品分别进行标记、风干、研磨、筛分, 分装保存。每个样地根系样品重复采集 5 次, 土壤样品重复采集 3 次。因此, 根系样品共采集 135 个, 土壤样品共采集 81 个。

表 1 样地信息

Table 1 Information of the sampling sites

编号 Code	地理位置 Geographical location	海拔 Elevation (m)	坡向 Aspect ($^{\circ}$)	坡度 Gradient ($^{\circ}$)
SM _{TG}	38.79° N, 110.37° E	1221.60	305	13
	38.79° N, 110.37° E	1224.12	320	15
	38.79° N, 110.37° E	1218.77	289	15
SM _{CM}	38.79° N, 110.37° E	1228.15	286	15
	38.79° N, 110.37° E	1209.74	264	13
	38.79° N, 110.37° E	1205.14	271	16
SM _{DZ}	38.80° N, 110.36° E	1131.42	334	16
	38.80° N, 110.36° E	1107.19	319	18
	38.80° N, 110.36° E	1107.19	303	15
AS _{TG}	36.80° N, 109.28° E	1262.66	23	18
	36.79° N, 109.28° E	1234.61	271	16
	36.79° N, 109.28° E	1228.53	330	15
AS _{CM}	36.80° N, 109.28° E	1281.48	309	13
	36.80° N, 109.28° E	1257.69	278	15
	36.80° N, 109.28° E	1249.07	330	14
AS _{DZ}	36.80° N, 109.28° E	1251.15	49	15
	36.80° N, 109.28° E	1231.23	310	14
	36.80° N, 109.28° E	1240.34	301	17
YS _{TG}	34.84° N, 108.13° E	1278.85	286	15
	34.84° N, 108.13° E	1283.51	313	18
	34.84° N, 108.13° E	1225.16	270	15
YS _{CM}	34.84° N, 108.13° E	1238.85	330	13
	34.84° N, 108.13° E	1253.51	310	15
	34.84° N, 108.13° E	1243.45	295	15
YS _{DZ}	34.84° N, 108.13° E	1210.21	263	14
	34.84° N, 108.13° E	1252.76	361	17
	34.84° N, 108.13° E	1243.28	254	16

编码中, 前两个字母代表不同采样区, 即 SM—榆林市神木市, AS—延安市安塞区, YS—咸阳市永寿县。In the coding, the first two letters represent different sampling areas, namely SM—Shenmu City, Yulin City, AS—Ansai District, Yan'an City, and YS—Yongshou County, Xianyang City; 下标两个字母代表不同样地, 即 TG—铁杆蒿样地, CM—长芒草样地, DZ—对照地; 下同。The two subscripts represent different sampling plots, namely TG—*A. gmelinii*, CM—*S. bungeana*, DZ—reference plot. The same below.

1.3 样品测定与计算

1.3.1 根系形态参数 根系样品平铺在扫描板上,扫描分辨率设置为 300 dpi 进行扫描(扫描仪 EPSON V7000,日本)。用根系分析软件(Regent WinRHIZO 2009a,加拿大)对根图像进行分析,分别获取径级在 $0\text{ mm} < d \leq 0.5\text{ mm}$ 、 $0.5\text{ mm} < d \leq 2\text{ mm}$ 和 $d > 2\text{ mm}$ 下的根系总长度、表面积和体积(d 表示根系直径)。通过公式(1)~(3)计算不同径级的根长密度(root length density, RLD)、根表面积密度(root surface area density, RSAD)和根体积密度(root volume density, RVD)^[17]。

$$RLD_i = \frac{RL_i}{V} \quad (1)$$

$$RSAD_i = \frac{RSA_i}{V} \quad (2)$$

$$RVD_i = \frac{RV_i}{V} \quad (3)$$

式中: RL 为根系样品的总根长(cm); RSA 为根系样品的总根表面积(cm^2); RV 为根系样品的总根体积(cm^3); i 为不同的根系径级($0\text{ mm} < d \leq 0.5\text{ mm}$ 、 $0.5\text{ mm} < d \leq 2\text{ mm}$ 和 $d > 2\text{ mm}$); V 为根系取样器的容积(1000 cm^3)。

1.3.2 土壤理化性质 土壤理化性质包括土壤有机质、土壤 pH、土壤机械组成(土壤黏粒、粉粒和砂粒含量)和金属氧化物含量(Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 CaO)。其中,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法进行测定;土壤 pH 采用电极法测定(pH 计 ST3100,奥豪斯,中国);土壤机械组成采用激光衍射法进行测定(激光粒度仪 MS-2000,马尔文,英国);金属氧化物采用 X 射线荧光光谱法进行测定(x 射线荧光光谱仪 S8 型,布鲁克,德国)^[23]。

1.3.3 土壤胶体表面电化学性质 土壤胶体表面电化学性质包括土壤表面电场(soil surface electric field, E_0)、表面电势(soil surface potential, φ_0)、表面电荷密度(soil surface charge density, σ_0)、比表面积(soil specific surface area, S)和表面电荷数量(soil surface charge number, SCN),采用联合法测定^[4]。详细步骤如下:称取 10 g 土壤样品,用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液进行脱钙处理。之后,用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 制备土壤 H^+ 饱和样。称取 5 g 土壤 H^+ 饱和样,用 25 mL $0.010\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 25 mL $0.016\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液平衡土样 24 h。离心后收集上清液,将其 pH 调至 7 左右。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Spectro,德国)测定上清液中的 Ca^{2+} 和 Na^+ 浓度。通过公式(4)~(8)计算各表面电化学性质。

$$\varphi_0 = \frac{2RT}{(2\beta_{\text{Ca}} - \beta_{\text{Na}})F} \ln \frac{a_{\text{Ca}}^0 N_{\text{Na}}}{a_{\text{Na}}^0 N_{\text{Ca}}} \quad (4)$$

$$\text{where: } \beta_{\text{Na}} = 0.0213 \ln \sqrt{I} + 0.7669, \beta_{\text{Ca}} = -0.0213 \ln \sqrt{I} + 1.2331$$

$$\sigma_0 = \text{sgn}(\varphi_0) \sqrt{\frac{\epsilon RT}{2\pi} \left[a_{\text{Na}}^0 \exp\left(-\frac{\beta_{\text{Na}} F \varphi_0}{RT}\right) + a_{\text{Ca}}^0 \exp\left(-\frac{2\beta_{\text{Ca}} F \varphi_0}{RT}\right) \right]} \quad (5)$$

$$S = \frac{N_{\text{Na}}^\kappa}{ma_{\text{Na}}^0} \exp\left(\frac{\beta_{\text{Na}} F \varphi_0}{2RT}\right) = \frac{N_{\text{Ca}}^\kappa}{ma_{\text{Ca}}^0} \exp\left(\frac{\beta_{\text{Ca}} F \varphi_0}{RT}\right) \quad (6)$$

$$\text{where: } \kappa = \sqrt{\frac{8\pi F^2 (a_{\text{Na}}^0 + 3a_{\text{Ca}}^0)}{\epsilon RT}}, m = 0.5259 \ln\left(\frac{C_{\text{Na}}}{C_{\text{Ca}}}\right) + 1.992$$

$$SCN = 10^5 \frac{S\sigma_0}{F} \quad (7)$$

$$E_0 = \frac{4\pi}{\epsilon} \sigma_0 \quad (8)$$

式中: R 为通用气体常数($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$); T 为绝对温度(K); F 为法拉第常数($\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$); β_{Na} 和 β_{Ca} 分别为 Na^+ 和 Ca^{2+} 的相对电荷系数; a_{Na}^0 和 a_{Ca}^0 分别为平衡状态下溶液中 Na^+ 和 Ca^{2+} 的活性($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$); N_{Na} 和 N_{Ca} 分别为平衡状态下扩散层中 Na^+ 和 Ca^{2+} 的吸附量($\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$); I 为离子强度($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$); ϵ 为水的介电常数; κ 为 Debye-Huckel 参数(m^{-1}); m 为单位换算系数; C_{Na} 和 C_{Ca} 分别为本体溶液中 Na^+ 和 Ca^{2+} 的平衡浓度($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)。

1.4 数据分析

采用最小显著差异检验(least significant difference test, LSD)分析不同样地根系形态参数、土壤理化性质和土壤胶体表面电化学性质的差异显著性($P < 0.05$)。采用Pearson相关分析法,分析不同径级的根系形态参数、土壤理化性质与土壤胶体表面电化学性质之间的相关性。采用双因素多元方差分析法,分析采样地(土壤类型)和植物类型对土壤胶体表面电化学性质的影响。通过回归分析建立根系形态参数与土壤胶体表面电化学性质的响应关系。采用决定系数(R^2)评估曲线拟合方程的质量。采用偏最小二乘法结构模型(partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM),分析植物根系影响土壤胶体表面电化学性质的显著路径。所有数据分析和图形建立均在SPSS 26.0、R语言4和Origin Pro 8.6中进行。

2 结果与分析

2.1 不同样地的根系形态参数

不同样地的根系形态参数如图1所示。铁杆蒿和长芒草根系形态参数(根长密度和根表面积密度)存在显著差异($P < 0.05$)。铁杆蒿样地的根长密度、根表面积密度和根体积分密度的变化范围分别是 $0.75 \sim 3.50 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.14 \sim 0.38 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.0038 \sim 0.0074 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;长芒草样地的根长密度、根表面积密度和根体积分密度的变化范围分别是 $1.37 \sim 3.42 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.11 \sim 0.23 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.0011 \sim 0.0016 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。此外,不同采样区,两种植物的根长密度和根表面积密度存在显著差异($P < 0.05$),并且平均根系形态参数在不同采样区的大小排序均表现为安塞<神木<永寿。因此,植物根系的形态参数存在明显的种间和空间差异。

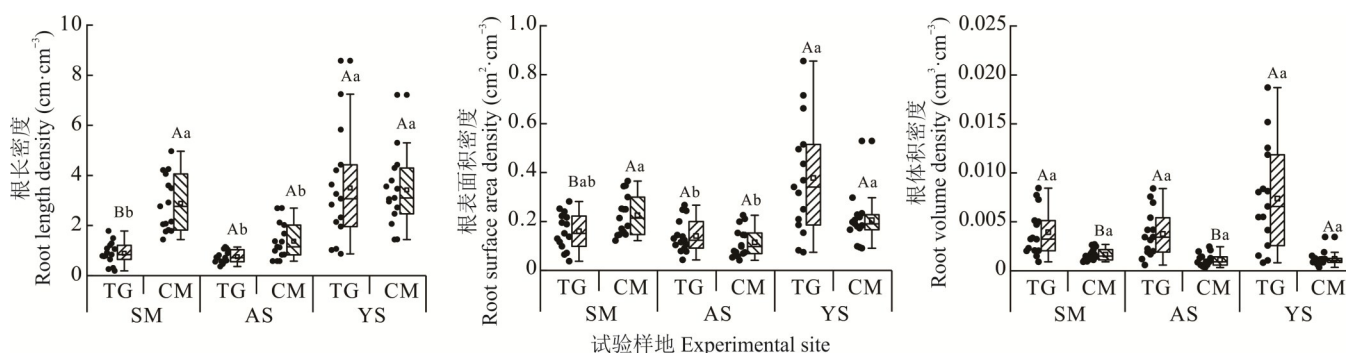


图1 不同样地的根系形态参数

Fig. 1 Root morphology parameters of different sampling sites

不同大写字母表示同一采样区内不同样地类型间的显著差异,不同小写字母表示同一类型不同采样区间的显著差异($P < 0.05$)。下同。Different uppercase letters indicate significant differences between different sample types within the same sampling area, and different lowercase letters indicate significant differences among different sampling areas within the same sample type ($P < 0.05$). The same below.

不同径级的根系形态参数占比如图2所示。对于根长密度,铁杆蒿和长芒草 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级的根系占比最大,平均占比为70.55%和96.81%;对于根表面积密度,铁杆蒿和长芒草分别为 $0.5 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 和 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级的根系占比最大,平均占比为59.72%和86.05%;对于根体积分密度,铁杆蒿和长芒草分别为 $0.5 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 和 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级的根系占比最大,平均占比为76.13%和79.81%。因此, $0 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 径级的细根是根系形态参数的主要贡献者。

2.2 不同样地的土壤理化性质

不同样地的土壤理化性质如表2所示。不同样地土壤有机质的变化范围是 $1.90 \sim 53.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $17.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤有机质的影响最大,分别增长了269.47%和482.11%(相比对照地);土壤pH的变化范围是7.57~8.07,平均值为7.82。铁杆蒿和长芒草分别在永寿和神木地区对土壤pH的影响最大,分别降低3.07%和4.58%;土壤黏粒的变化范围是5.90%~24.32%,平均值为13.73%。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤黏粒的影响最大,分别增长了56.61%和107.80%;土壤粉粒的变化范围是

42.68%~72.27%,平均值为 59.60%。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤粉粒的影响最大,分别增长了 25.61% 和 28.61%;土壤砂粒的变化范围是 6.12%~51.42%,平均值为 26.63%。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤砂粒的影响最大,分别降低了 27.75% 和 36.11%; Al_2O_3 含量的变化范围是 10.52%~12.83%,平均值为 11.63%。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对 Al_2O_3 含量的影响最大,分别增长了 5.42% 和 6.27%; CaO 含量的变化范围是 4.74%~8.22%,平均值为 6.50%。铁杆蒿在神木地区对 CaO 含量的影响最大,增长了 3.22%; Fe_2O_3 含量的变化范围是 3.45%~5.17%,平均值为 4.29%。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对 Fe_2O_3 含量的影响最大,分别增长了 15.36% 和 8.70%。因此,研究区植被恢复对土壤理化性质有显著影响,并且这种影响存在明显的种间和空间差异。

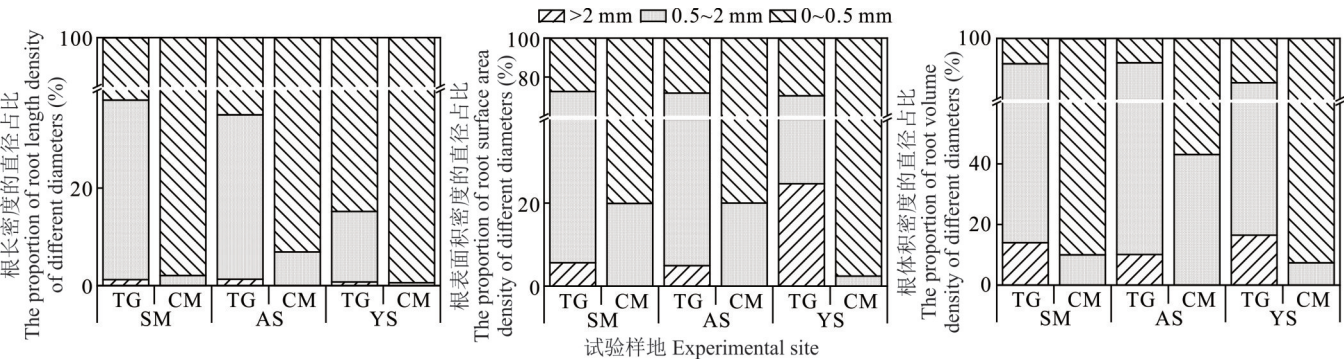


图2 不同径级的根系形态参数占比
Fig. 2 Proportion of root morphological parameters at different diameter grades

表 2 不同样地的土壤理化性质(均值±标准差)

Table 2 Soil physical and chemical properties of all the sampling sites (mean±SD)

编码	有机质	pH	黏粒	粉粒	砂粒	氧化铝	氧化钙	氧化铁
Code	Organic matter (g·kg ⁻¹)		Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
SM _{TG}	7.02±4.10Abb	7.85±0.14Bab	9.24±0.73ABb	53.61±3.12ABb	37.15±3.85ABa	11.09±0.41Ab	6.45±0.32Aa	3.98±0.18Ab
SM _{CM}	11.06±3.02Ab	7.70±0.04Bb	12.26±3.02Ab	54.89±7.53Ab	32.85±10.56Ba	11.18±0.23Ab	4.74±0.87Bb	3.75±0.32ABb
SM _{DZ}	1.90±0.37Bb	8.07±0.05Aa	5.90±1.08Bb	42.68±6.06Bc	51.42±7.05Aa	10.52±0.09Bc	4.88±0.48Bc	3.45±0.18Bc
AS _{TG}	6.20±2.03Ab	7.95±0.23Aa	8.42±1.11Ab	56.12±1.88Ab	35.46±2.82Aa	10.88±0.05Ab	8.22±0.69Aa	3.82±0.06Ab
AS _{CM}	8.12±5.41Ab	7.95±0.15Aa	10.13±3.24Ab	58.50±4.49Ab	31.37±5.56Aa	11.72±0.81Ab	7.42±1.37Aa	4.14±0.34Ab
AS _{DZ}	3.64±0.61Ab	7.86±0.06Ab	8.29±0.17Ab	59.31±0.12Ab	32.41±0.18Ab	11.10±0.13Ab	7.63±0.21Aa	4.01±0.03Ab
YS _{TG}	53.39±12.34Aa	7.57±0.12Bb	24.32±1.70Aa	68.92±4.12Aa	6.76±1.15Ab	12.57±0.42Aa	6.54±1.63Aa	5.17±0.25Aa
YS _{CM}	38.88±12.08ABa	7.64±0.10ABb	23.64±4.73Aa	70.14±4.00Aa	6.12±1.21Ab	12.75±0.07Aa	6.35±0.69Aab	5.17±0.04Aa
YS _{DZ}	27.07±2.01Ba	7.81±0.02Ab	21.35±2.99Aa	72.27±1.27Aa	6.17±2.01Ac	12.83±0.02Aa	6.30±0.10Ab	5.12±0.02Aa

不同大写字母表示同一采样区内不同样地类型间的显著差异,不同小写字母表示同一样地类型不同采样区间的显著差异($P<0.05$)。下同。
Different uppercase letters indicate significant differences between different sample types within the same sampling area, and different lowercase letters indicate significant differences between different sampling areas within the same sample type ($P<0.05$). The same below.

2.3 不同样地的土壤胶体表面电化学性质

不同样地的土壤胶体表面电化学性质如图 3 所示。不同样地土壤表面电场的变化范围是 $1.23\times 10^8\sim 28.46\times 10^8\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$,平均值为 $7.46\times 10^8\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤表面电场的影响最大,分别降低了 89.67% 和 78.42%(相比对照地);土壤表面电势的变化范围是 $-149.91\sim -81.33\text{ mV}$,平均值为 -109.83 mV 。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤表面电势的影响最大,分别降低了 30.30% 和 22.60%;土壤表面电荷数量的变化范围是 $7.26\sim 24.34\text{ cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $13.75\text{ cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$ 。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤表面电荷数量的影响最大,分别增长了 89.67% 和 78.42%;土壤比表面积的变化范围是 $8.32\sim 147.38$

$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $65.93 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。各采样区的土壤比表面积无显著差异 ($P > 0.05$); 土壤表面电荷密度的变化范围是 $0.09 \sim 2.02 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均值为 $0.53 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。铁杆蒿和长芒草均在神木地区对土壤表面电荷密度的影响最大, 分别降低了 89.67% 和 78.42% 。因此, 研究区植被恢复对土壤胶体表面电化学性质有显著影响, 并且这种影响存在明显的种间和空间差异。

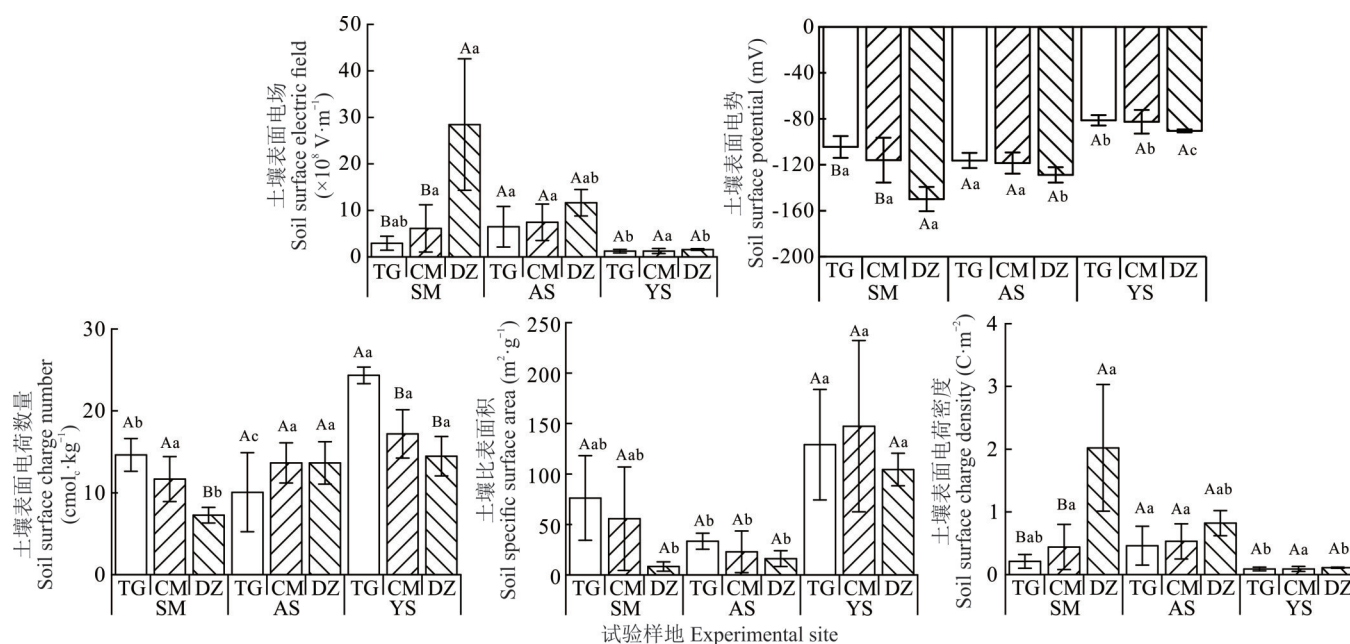


图3 不同样地的土壤胶体表面电化学性质

Fig. 3 Electrochemical properties of soil colloid surface of different sampling sites

2.4 植物根系、土壤理化性质与土壤胶体表面电化学性质的关系

对不同径级下的根系形态参数与土壤胶体表面电化学性质进行相关分析, 结果如表3所示。土壤表面电场、表面电势和表面电荷密度与 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级下的根长密度和根表面积密度显著负相关 ($P < 0.05$); 土壤比表面积与 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级下的根长密度和根表面积密度显著正相关 ($P < 0.05$); 土壤表面电荷数量与所有径级下的根长密度、 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 和 $d > 2 \text{ mm}$ 径级下根表面积密度以及 $0.5 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 和 $d > 2 \text{ mm}$ 径级下的根体积密度极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 $0.5 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 径级下根表面积密度和 $0 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级下根体积密度显著正相关 ($P < 0.05$)。

根系形态参数中, 根表面积密度与土壤胶体表面电化学性质的相关系数最高, 因此被选出与土壤胶体表面电化学性质进行回归分析(图4)。结果表明, 根表面积密度与土壤表面电场、表面电势、表面电荷密度、比表面积和表面电荷数量均呈指数函数关系 ($R^2 = 0.35, P < 0.01$; $R^2 = 0.38, P < 0.01$; $R^2 = 0.35, P < 0.01$; $R^2 = 0.48, P < 0.01$; $R^2 = 0.67, P < 0.01$)。

对土壤理化性质与根系形态参数和土壤胶体表面电化学性质进行相关分析, 结果如表4所示。根系形态参数中, 根长密度与土壤有机质和pH极显著相关 ($P < 0.01$), 与黏粒、砂粒、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量显著相关 ($P < 0.05$); 根表面积密度与土壤有机质和pH极显著相关 ($P < 0.01$); 根体积密度与土壤有机质极显著相关 ($P < 0.01$), 与土壤pH显著相关 ($P < 0.05$)。土壤胶体表面电化学性质中, 土壤表面电场、表面电势、表面电荷数量和表面电荷密度与土壤有机质、pH、黏粒、粉粒和砂粒、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量极显著相关 ($P < 0.01$); 土壤比表面积与土壤有机质、pH、黏粒、砂粒、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量极显著相关 ($P < 0.01$), 与粉粒显著相关 ($P < 0.05$)。此外, 通过双因素多元方差分析可知, 采样地(土壤类型)对土壤胶体表面电化学性质的影响显著 ($P < 0.01$), 植物类型以及采样地和植物类型的交互作用对土壤胶体表面电化学性质的影响不显著 ($P > 0.05$, 表5)。

表 3 植物根系形态参数与土壤胶体表面电化学性质的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between root morphological parameters and electrochemical properties of soil colloid surface

指标 Index	根系径级 Root diameter grade	表面电场 Surface electric field	表面电势 Surface potential	表面电荷数量 Surface charge number	比表面积 Specific surface area	表面电荷密度 Surface charge density
根长密度 Root length density	全部根系 Total roots	-0.407*	-0.450*	0.564**	0.393*	-0.407*
	0 mm<d≤0.5 mm	-0.385*	-0.424*	0.520**	0.393*	-0.385*
	0.5 mm<d≤2 mm	-0.308	-0.351	0.519**	0.152	-0.308
	0 mm<d≤2 mm	-0.406*	-0.503*	0.562**	0.394*	-0.406*
	d>2 mm	-0.268	-0.342	0.511**	0.133	-0.268
根表面积密度 Root surface area density	全部根系 Total roots	-0.423*	-0.448*	0.601**	0.314	-0.423*
	0 mm<d≤0.5 mm	-0.409*	-0.453*	0.509**	0.382*	-0.409*
	0.5 mm<d≤2 mm	-0.269	-0.275	0.461*	0.106	-0.269
	0 mm<d≤2 mm	-0.425*	-0.479*	0.596**	0.320	-0.425*
	d>2 mm	-0.266	-0.345	0.516**	0.143	-0.267
根体积密度 Root volume density	全部根系 Total roots	-0.345	-0.385*	0.551**	0.199	-0.345
	0 mm<d≤0.5 mm	-0.358	-0.365	0.388*	0.273	-0.358
	0.5 mm<d≤2 mm	-0.288	-0.321	0.487**	0.147	-0.288
	0 mm<d≤2 mm	-0.354	-0.385*	0.543**	0.204	-0.354
	d>2 mm	-0.265	-0.337	0.517**	0.153	-0.265

注：*表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$), 下同。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$). The same below.

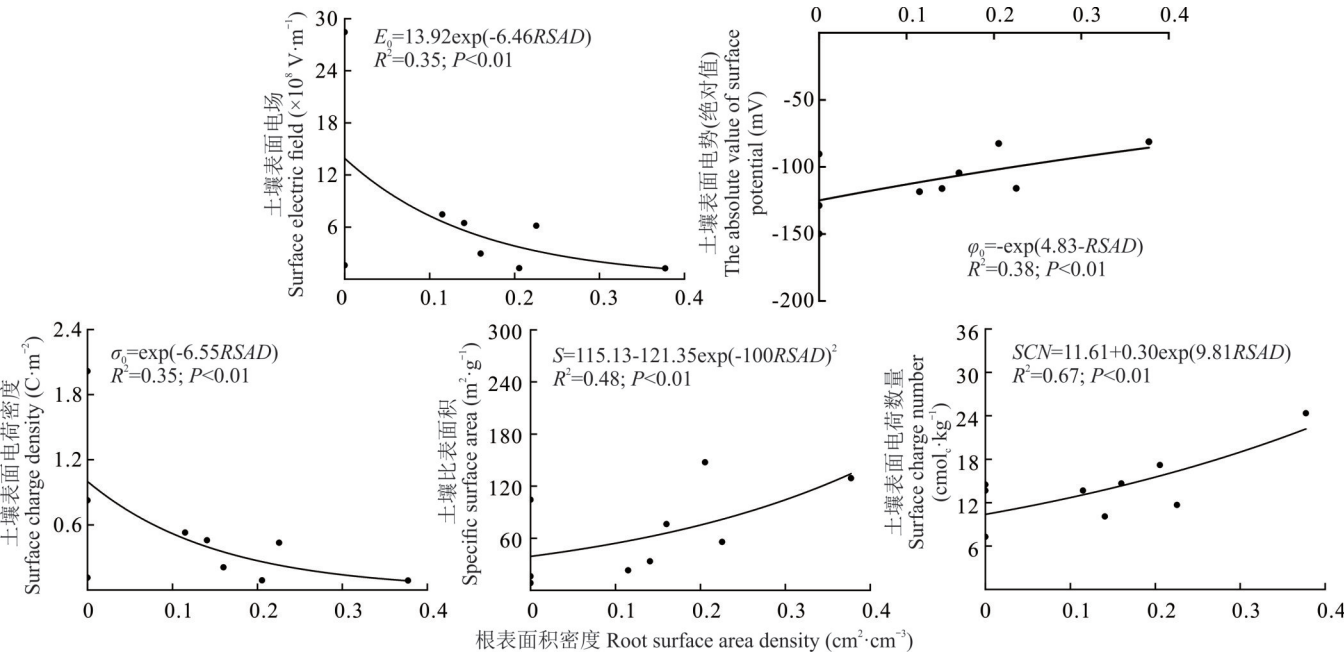


图 4 根表面积密度与土壤胶体表面电化学性质的关系

Fig. 4 Relationships between root surface area density and electrochemical properties of soil colloid surface

RSAD: 根表面积密度 Root surface area density; E_0 : 土壤表面电场 Soil surface electric field; ϕ_0 : 表面电势 Surface potential; σ_0 : 表面电荷密度 Surface charge density; S: 比表面积 Specific surface area; SCN: 表面电荷数量 Surface charges number.

2.5 路径分析

根据植物根系、土壤理化性质和土壤胶体表面电化学性质的相关分析结果(表 3 和表 4),以及植物根系影响土壤胶体表面电化学性质的主要机制,以根系形态参数为外生变量,对根系形态参数和土壤胶体表面电化学性质

进行偏最小二乘法结构模型(PLS-SEM)分析。结果如图5所示:植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响以间接效应为主,显著路径表现为植物根系—土壤化学性质(土壤pH+有机质)—土壤物理性质(土壤机械组成+金属氧化物)—土壤胶体表面电化学性质,模型拟合优度为0.71。

表4 植物根系形态参数和土壤性质的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between root morphology parameters and soil properties

指标 Index	有机质 Organic matter	pH	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	氧化铝 Al ₂ O ₃	氧化钙 CaO	氧化铁 Fe ₂ O ₃
根长密度 Root length density	0.646**	−0.691**	0.424*	0.304	−0.384*	0.434*	−0.241	0.441*
根表面积密度 Root surface area density	0.601**	−0.610**	0.287	0.261	−0.294	0.341	−0.139	0.361
根体积密度 Root volume density	0.488**	−0.406*	0.118	0.230	−0.197	0.161	0.047	0.261
表面电场 Surface electric field	−0.489**	0.544**	−0.556**	−0.527**	0.587**	−0.598**	−0.251	−0.626**
表面电势 Surface potential	−0.760**	0.665**	−0.800**	−0.647**	0.780**	−0.800**	−0.086	−0.847**
表面电荷数量 Surface charge number	0.786**	−0.666**	0.594**	0.659**	−0.693**	0.629**	0.119	0.728**
比表面积 Specific surface area	0.658**	−0.587**	0.711**	0.464*	−0.629**	0.654**	−0.083	0.715**
表面电荷密度 Surface charge density	−0.489**	0.544**	−0.555**	−0.528**	0.587**	−0.598**	−0.252	−0.626**

表5 土壤胶体表面电化学性质双因素多元方差分析结果

Table 5 Two-factor multivariate variance results of electrochemical properties of soil colloidal surface

变异源 Mutation source	偏Eta平方 Partial Eta square	误差自由度 Error degree of freedom	假设自由度 Suppose degrees of freedom	<i>F</i>	<i>P</i>
采样地(土壤类型) Sampling site (soil type)	0.770	16.00	10.00	5.368	0.002
植被类型 Vegetation type	0.301	8.00	5.00	0.689	0.646
采样地×植被类型 Sampling site×vegetation type	0.423	16.00	10.00	1.171	0.375
总变异 Total variation	1.494	40.00	25.00		

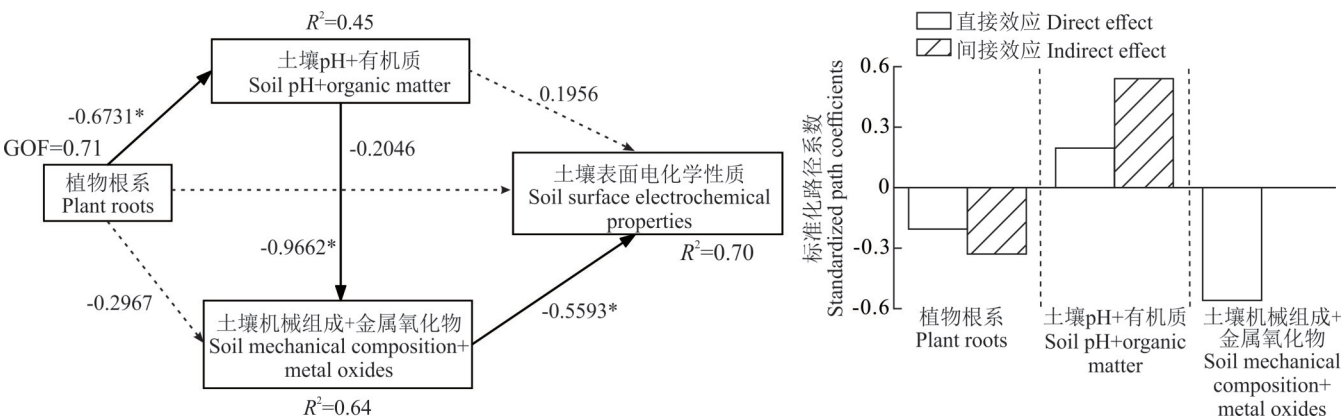


图5 路径分析

Fig. 5 Path analysis

实线和虚线分别为显著和不显著的标准化路径。GOF为拟合优度。The solid and dashed lines are the standardized paths of significance and insignificance, respectively. GOF indicates the goodness of fit.

3 讨论

3.1 植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响

植物根系对土壤胶体表面电化学性质有显著影响^[24]。本研究中,各采样区草本植物样地的土壤表面电场、表

面电势、表面电荷密度均低于对照地,土壤比表面积和表面电荷数量均高于对照地(图 3)。此外,根系形态参数与土壤胶体表面电化学性质具有显著相关性(表 3),并呈指数函数关系(图 4)。与杨亚楠等^[12]和 Ali 等^[14]通过相关试验得到的结果类似:伴随植被恢复,土壤胶体表面电化学性质发生了显著变化。

植物根系通过物理截留^[24]、吸附交换^[18]和改变土壤理化性质等^[14]方式影响土壤胶体表面电化学性质。其中,改变土壤理化性质是植物根系调控土壤胶体表面电化学性质的显著路径(图 5)。在 Liu 等^[13]对黄土高原不同恢复年限草地的研究中指出,土壤有机质和粉粒是决定土壤胶体表面电化学性质的主要因素,解释率分别为 37.5% 和 33.0%。因此,改变土壤有机质和粉粒是植物根系生长影响土壤胶体表面电化学性质的关键。1)土壤有机质:植物根系通过分泌、分解、沉积、转化等多种方式促进土壤有机质积累^[25]。土壤有机质富含腐殖质(占比>90%),能提供大量可变电荷,显著改变土壤表面电荷数量^[26]。此外,其独特的三维多聚物相结构^[12]使其同时具有内外表面积,增加了土壤电荷的吸附位点,从而改变土壤表面性质。Yukselen-Aksoy 等^[27]和 Emmanuel 等^[28]的研究也证实:土壤有机质与土壤表面电荷数量和比表面积显著正相关;2)根系生长通过分泌黏液和物理交织等作用促进土壤粉粒的积累^[13,20]。土壤粉粒富含膨胀性 2:1 型黏土矿物(如蒙脱石、伊利石和蛭石)。这类矿物具有更大的比表面积和更高的表面电荷密度^[1,29]。因此,土壤粉粒含量的差异会显著影响土壤胶体表面电化学性质。与杨亚楠等^[12]和 Liu 等^[13]的研究结果一致。

此外,植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响还与其形态特征有关,特别是根系直径。由表 3 可知,土壤胶体表面电化学性质仅与 $0\text{ mm}<d\leq 0.5\text{ mm}$ 径级下的根系形态参数(根长密度和根表面积)存在显著相关性($P<0.05$)。这与以下原因有关:1) $0\text{ mm}<d\leq 0.5\text{ mm}$ 径级的根系占比明显多于其他径级(平均值高达 62.61%,图 2),使此径级的根系对土壤胶体表面电化学性质的作用更为突出;2) $0\text{ mm}<d\leq 0.5\text{ mm}$ 径级的根系由于其形态和功能特征,能够更为有效地改变土壤理化性质。例如,该径级的根系具有更大的根—土界面,促进土壤细颗粒(黏粒和粉粒)的积累;分泌更多的有机物,增加土壤有机质含量;改善根际微生物的多样性和组成,加速寄主根系生长等。同时,分布在根尖的根毛还能进一步增强上述效应。因此,植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响还取决于细根的数量。

3.2 植物根系调控土壤胶体表面电化学性质的空间差异

植物根系对土壤胶体表面电化学性质的调控效应具有明显的空间差异。由图 3 所示,不同地区的土壤胶体表面电化学性质具有显著差异($P<0.05$)。通过计算可知,由植物根系生长引起的土壤表面电场、表面电势和表面电荷密度的变化量在不同采样区的大小关系表现为永寿地区<安塞地区<神木地区;土壤表面电荷数量表现为永寿地区<神木地区<安塞地区。杨亚楠等^[12]也通过试验发现,植被恢复对土壤胶体表面电化学性质的影响存在显著的空间差异。植物根系调控土壤胶体表面电化学性质的空间差异主要源于不同环境下植物根系的生长情况和根系—土壤互馈机制不同。

不同采样区的根系形态参数(根长密度、根表面积密度和根体积密度)存在明显差异,其中在永寿地区的数值最大,其次是神木和安塞地区。这种差异与各采样区的环境条件密切相关^[22,30]。例如,Monique 等^[31]通过试验发现,根系密度随着年平均降水量的减少而降低。Hao 等^[32]通过试验得出,由于砂质土壤的资源(如水和养分)有效性较低,根系密度与砂粒含量呈负相关关系。在本研究中,神木、安塞和永寿地区的年平均降水量分别为 441、505 和 602 mm^[33],土壤砂粒含量分别为 40.47%、33.08% 和 6.35%。由此可见,永寿地区降水充足且土壤砂粒含量低,为植物根系生长提供了更优越的条件,因此其根系生长状况最为理想,本试验结果与其一致。

此外,植物根系对土壤理化性质的影响也存在明显的空间差异(表 2)。通过计算,在植物根系生长的作用下,土壤有机质在神木、安塞和永寿地区分别增长了 3.76、0.97 和 0.71 倍,土壤粉粒在神木地区增长了 0.27 倍,而在安塞和永寿地区的变化不明显。由此可见,植物根系在神木地区对土壤理化性质的影响最为明显,其次是安塞和永寿地区。这种差异产生的主要原因是神木地区地处我国黄土高原的风蚀水蚀交错带,土壤侵蚀情况极为严重,土壤有机质和细小颗粒(土壤黏粒和粉粒)极易在外力作用下发生迁移或流失。在此情况下,植物根系可通过交错、翻转等物理方式以及分泌胶结物质等化学方式,更为有效地阻截土壤颗粒,提高土壤稳定性,进而促进土

壤有机质和土壤细颗粒的积累^[22]。因此,本研究中,植物根系在神木地区对土壤理化性质(土壤有机质和粉粒)的影响最为显著,其次是安塞和永寿地区。

综合上述分析,不同采样区的植物根系生长状况及其对土壤理化性质的作用均表现出明显的空间差异,导致植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响也存在明显的空间差异。由于植物根系主要通过改变土壤理化性质来影响土壤胶体表面电化学性质,而其对土壤理化性质的影响程度在神木地区最强,其次为安塞和永寿地区,因此,植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响程度也遵循神木地区最强,安塞和永寿地区次之的相同趋势。

4 结论

本试验以黄土高原3个不同采样区(神木、安塞和永寿)的典型草本植物为研究对象,分析了植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响。结果表明:1)植物根系对土壤胶体表面电化学性质具有显著影响。根系形态参数与土壤胶体表面电化学性质显著相关($P<0.05$, $P<0.01$),并呈指数函数关系($R^2=0.35\sim0.67$, $P<0.01$)。此外,植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响以间接效应为主,主要是通过改变土壤理化性质的方式实现;2)植物根系对土壤胶体表面电化学性质的影响存在空间差异。由于不同试验区根系的生长情况以及根-土互馈机制的差异,植物根系在神木地区对土壤胶体表面电化学性质的影响最为显著,其次是安塞和永寿地区。此结果有助于进一步认识根系对土壤表面电化学特性的影响,为土壤功能和退化生态系统的恢复提供基础依据。

参考文献 References:

- [1] Huang C Y, Xu J M. Soil science. Beijing: China Agriculture Press, 2016.
黄昌勇, 徐建明. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [2] Miller J O, Karathanasis A D, Tsang D C W, *et al.* The role of colloidal systems in environmental protection. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014.
- [3] Jiang X, Ma Y, Yuan J, *et al.* Soil particle surface electrochemical property effects on abundance of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea, NH_4^+ activity, and net nitrification in an acid soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(11): 2215–2221.
- [4] Liu X M, Li H, Li R, *et al.* Combined determination of surface properties of nanocolloidal particles through ion selective electrodes with potentiometer. *Analyst*, 2013, 138(4): 1122–1129.
- [5] Xu C Y, Yu Z, Li H. The coupling effects of electric field and clay mineralogy on clay aggregate stability. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(5): 1159–1168.
- [6] Raudkivi A J, Hutchison D L. Erosion of kaolinite clay by flowing water. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1974, 337: 537–554.
- [7] Hu F N, Liu J F, Xu C Y, *et al.* Soil internal forces contribute more than raindrop impact force to rainfall splash erosion. *Geoderma*, 2018, 330: 91–98.
- [8] Bayat H, Ebrahimi E, Ersahin S, *et al.* Analyzing the effect of various soil properties on the estimation of soil specific surface area by different methods. *Applied Clay Science*, 2015, 116/117: 129–140.
- [9] Gruba P, Mulder J. Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 655–662.
- [10] Gaurav M, Magboul M S, Fuat K, *et al.* Machine learning for cation exchange capacity prediction in different land uses. *Catena*, 2022, 216: 106404.
- [11] Chen J J. The process effects of the hedgerows on water erosion driven by soil electric field. Chongqing: Southwest University, 2014.
陈晶晶. 基于表面电场驱动土壤侵蚀理论下的植物篱措施水力侵蚀控制过程研究. 重庆: 西南大学, 2014.
- [12] Yang Y N, Liu J Y, Wang P P, *et al.* Effects of typical vegetation communities on soil surface electrochemical properties and their spatial difference on the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 345–351.
杨亚楠, 刘均阳, 王佩佩, 等. 黄土高原典型植被群落对土壤表面电化学性质的影响及其空间差异. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 345–351.
- [13] 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. *Catena*, 2020, 190: 1–8.
- [14] Ali W, Hussain S, Chen J Z, *et al.* Cover crop root-derived organic carbon influences aggregate stability through soil internal forces in a clayey red soil. *Geoderma*, 2023, 429: 116271.
- [15] Hou J, Ye G F, Zhang L H. Research advances on soil around forest trees rhizosphere. *Protection Forest Science and Technology*, 2006(1): 30–33.
侯杰, 叶功富, 张立华. 林木根际土壤研究进展. *防护林科技*, 2006(1): 30–33.
- [16] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, *et al.* Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 266: 68–75.
- [17] Liu J Y, Zhou Z C, Liu J, *et al.* Effects of root density on soil detachment capacity by overland flow during one growing season. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(5): 1500–1510.
- [18] Zhang J S. *Plant physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2006.
张继澍. *植物生理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] Wang B, Liu G B, Xue S, *et al.* Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62: 915–925.
- [20] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, *et al.* The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment. *Catena*, 2018, 166: 192–199.
- [21] Li J J, Li Z, Lu Z M. Analysis of spatiotemporal variations in land use on the Loess Plateau of China during 1986–2010. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 997–1005.
- [22] Liu J Y, Zhou Z C, Su X M. Spatial and temporal differences in soil erodibility influenced by typical herb roots on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2025(10): 4855–4866.
刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 黄土高原典型草本植物根系影响土壤可蚀性的时空差异特征. *生态学报*, 2025(10): 4855–4866.
- [23] Liu J Y, Yang Y N, Zheng Q W, *et al.* Effects of soil surface electrochemical properties on soil detachment regulated by soil types and plants. *Science of Total Environment*, 2022, 834: 154991.
- [24] Liu J Y, Yang Y N, Zheng Q W, *et al.* Response of soil aggregate stability and soil erodibility to soil electric field. *Catena*, 2022, 215: 106338.
- [25] Liu J Y, Zhou Z C, Han W X. Effects of herbaceous root growth on soil resistance to erosion under different planting densities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 40–47.
刘均阳, 周正朝, 韩玮霄. 不同种植密度下草本植物根系生长对土壤侵蚀阻力的影响. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 40–47.
- [26] Saidian M, Godinez L J, Prasad M. Effect of clay and organic matter on nitrogen adsorption specific surface area and cation exchange capacity in shales (mudrocks). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 1095–1106.
- [27] Yukselen-Aksoy Y, Kaya A. Method dependency of relationships between specific surface area and soil physicochemical properties. *Applied Clay Science*, 2010, 50(2): 182–190.
- [28] Emmanuel A, Markus T, Trine N, *et al.* Contribution of organic carbon to the total specific surface area of soils with varying clay mineralogy. *Geoderma*, 2023, 430: 116314.
- [29] Tang Y, Li H, Liu X M, *et al.* Unraveling the size distributions of surface properties for purple soil and yellow soil. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 32: 81–89.
- [30] Lioba R, Kai F, Yan C, *et al.* Responses of root architecture and the rhizosphere microbiome assembly of maize (*Zea mays* L.) to a soil texture gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 181: 109026.
- [31] Monique W, Grégoire T, Freschet A S, *et al.* Patterns in intraspecific variation in root traits are species-specific along an elevation gradient. *Functional Ecology*, 2020, 35(2): 342–356.
- [32] Hao H X, Qin J H, Sun Z X, *et al.* Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils. *Catena*, 2021, 203(9): 105378.
- [33] Zheng S X, Shangguan Z P. Photosynthetic physiological adaptabilities of *Pinus tabulaeform* and *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau. *Journal of Applied Ecology*, 2007(1): 16–22.
郑淑霞, 上官周平. 黄土原油松和刺槐叶片光合生理适应性比较. *应用生态学报*, 2007(1): 16–22.