

# 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

杨亚楠, 刘均阳, 王佩佩, 杨晓晶, 周正朝

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** 为探究黄土高原不同区域典型植被生长对土壤表面电化学性质的影响,以黄土高原自南向北的3个典型区域(永寿塬、坊塔、六道沟)及2种典型乡土草本植物(铁杆蒿(*Artemisia gmelinii* Web.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.))为研究对象,以退耕1年的撂荒地作为对照,通过土壤样品采集和土壤表面电化学性质的测定,研究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。结果表明:(1)在黄土高原地区,相较于撂荒地,典型植被群落生长使土壤黏粒、粉粒、有机质含量增加,土壤pH、容重、砂粒含量减少;(2)同一区域内,相较于撂荒地,植被恢复促进了土壤阳离子交换量、比表面积的增加,减少了表面电荷密度和表面电场强度,其变化范围分别为6.69~24.34 cmol/kg, 7.29~182.29 m<sup>2</sup>/g, 0.08~2.04 C/m<sup>2</sup>, 1.23~28.46 10<sup>8</sup> V/m;不同区域间,同一植被群落下永寿塬土壤阳离子交换量、比表面积的增量最高,而六道沟土壤表面电化学性质的变化率最高,说明典型植被群落对土壤表面电化学性质的影响具有空间差异性;(3)典型植物群落下土壤粉粒含量和有机质含量与土壤表面电化学性质具有显著的相关性,其变化是影响黄土高原地区土壤电化学性质变化的主要原因,解释率分别为61.0%, 11.1%。研究结果为认识黄土高原地区植被恢复及其调控作用提供参考。

**关键词:** 土壤表面电化学性质; 土壤类型; 典型植被群落; 空间差异; 黄土高原

**中图分类号:** S153.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2022)03-0345-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.049

## Effects of Typical Vegetation Communities on Soil Surface Electrochemical Properties and Their Spatial Difference on the Loess Plateau

YANG Yanan, LIU Junyang, WANG Peipei, YANG Xiaojing, ZHOU Zhengchao

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

**Abstract:** In order to investigate the influence of typical vegetation growth to the soil surface electrochemical properties of soil surface in different regions of loess Plateau, Taking three typical regions from south to north on the Loess Plateau (Yongshouliang, Fangta, Liudaogou) and two typical herbaceous plants (*Artemisia gmelinii* Web., *Stipa bungeana* Trin.) as research objects, and the abandoned land for one year as the control, the effect of two typical herbaceous plants on soil surface electrochemical properties and their spatial difference were analyzed based on collecting soil samples and measuring the soil surface electrochemical properties. The results showed that: (1) On the Loess Plateau, compared with the abandoned land, the growth of typical vegetation communities increased the contents of clay, silt and organic matter in soil, while decreased the content of pH, bulk density and sand. (2) In the same region, Soil cation exchange capacity and specific surface area increased and surface charge density and surface electric field intensity decreased with vegetation restoration, varying in the range of 6.69~24.34 cmol/kg, 7.29~182.29 m<sup>2</sup>/g, 0.08~2.04 C/m<sup>2</sup>, 1.23~28.46 10<sup>8</sup> V/m. In different regions, with the influence of the same plant species, soil cation exchange capacity and specific surface area increased the most in Yongshouliang, and the rates of soil surface electrochemical properties change were the greatest in Liu daogou. It indicated that the influence of typical herbaceous plants on soil surface electrochemical properties has spatial heterogeneity, which may be attributed to the climate, soil texture, and other factors. (3) Silt content and organic matter content were the main con-

收稿日期: 2021-10-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977061); 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-02)

第一作者: 杨亚楠(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土资源评价与规划研究。E-mail: ynyang@snnu.edu.cn

通信作者: 周正朝(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zczhou@snnu.edu.cn

tributors to soil surface electrochemical properties on the Loess Plateau due to their significant correlation and the change was the main reason for the change of soil electrochemical properties on the Loess Plateau, explaining 61.0% and 11.1% of the changes, respectively.

**Keywords:** electrochemical properties of soil surface; soil type; typical vegetation communities; spatial difference; the Loess Plateau

土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是连接水圈、生物圈、大气圈、岩石圈的重要纽带,是众多物理、化学及生物过程发生的主要场所<sup>[1]</sup>。土壤表面电化性质是土壤具有一系列物理、化学性质的根本原因,对土壤肥力、团聚体稳定性、入渗、土壤侵蚀等诸多宏观土壤特性具有深远的影响<sup>[2-3]</sup>。因此,土壤表面电化性质的研究对认识土壤系统的现象与功能具有重要意义。

土壤表面电化性质主要包括土壤阳离子交换量、比表面积、表面电荷密度、表面电场强度及表面电位<sup>[4-5]</sup>。土壤表面电化性质既受土壤机械组成、有机质、pH、土壤矿物组成等土壤内部因素的影响,又受土地利用方式(如植被恢复)等外部因素的影响<sup>[5]</sup>。植被可通过 2 种方式对土壤表面电化性质产生影响,首先,植被生长能有效促进土壤黏化作用,减小土壤细颗粒的流失<sup>[6]</sup>,而黏粉粒的富集可以有效促进土壤阳离子交换量和土壤比表面积的增加<sup>[7]</sup>;其次,植被通过枯枝落叶及根系分泌物提高土壤有机质的含量<sup>[8]</sup>,有机质中包含大量的腐殖质(占土壤有机质 90% 以上),腐殖质是可变电荷的重要来源<sup>[9]</sup>,从而有效地改变土壤表面电化性质。

目前,关于植被恢复对土壤表面电化性质影响的研究,主要集中于同一区域的相似环境条件下进行<sup>[5]</sup>,不同区域间植被恢复对土壤表面电化性质影响的空间差异还鲜有报道,制约了大尺度上植被对土壤表面电化性质影响的认识。因此,研究不同区域典型植被群落对土壤表面电化性质的影响,对于较大尺度上植被恢复生态效应综合评价及管理具有较强意义。黄土高原是我国生态环境最为脆弱的地区之一,为治理黄土高原地区强烈的土壤侵蚀,国家推行了退耕还林(草)政策。在这一政策背景下,黄土高原地区植被得到显著恢复,生态环境得到有效改善<sup>[10]</sup>。黄土高原区域年均温、降水量、土壤类型等都呈现地带性分布特征,其不同区域植被的生长和恢复存在一定的差异,同种植物对土壤性质的影响也存在空间差异性<sup>[11]</sup>。

因此,本研究以黄土高原不同区域间(永寿梁、坊塌、六道沟)2 种乡土植被群落类型(铁杆蒿(*Artemisia gmelinii* Web.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.))为研究对象,对比分析典型植被群落对土壤表面电化特性的影响及空间差异,以期加深较大尺度上植被恢复对土壤表面电化性质的影响的认识,

并为科学评估植被恢复措施提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原位于我国黄河中上游地区(33°41′—41°16′N,100°52′—114°33′E),海拔 800~3 000 m,面积  $6.4 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,是世界上最大的黄土堆积平原。气候类型属温带大陆性季风气候,年均气温 6.6~14.3℃,年均降水量 466 mm,降水分布不均,从东南向西北递减。黄土高原土壤具有地带性分布特征,从东南向西北,土壤类型依次为壤土和褐土、黄绵土和黑垆土、灰钙土、栗钙土、棕钙土、棕漠土、风沙土等。

### 1.2 试验样地及样品采集

通过野外实地调研,在黄土高原 3 个典型区域,即咸阳市永寿梁(黑垆土)、延安市安塞区坊塌小流域(黄绵土)、榆林市神木县六道沟小流域(砂黄土)进行采样。由于研究区主要以草本植物为主,因而挑选了乡土植物群落长芒草和铁杆蒿样地作为研究样地,所选择地均为植被恢复 10 年以上的退耕地,采样时间为 2020 年 7—9 月。同时,以样地附近退耕 1 年的撂荒地作为对照。在每个土壤类型区选择坡向、位置相近的 3 个坡面作为重复。

采样时,选择植被长势均匀的坡面作为采样点(表 1)。在每个样点开挖 30 cm 深的土壤剖面,去除地表枯落物,分 2 层(0—15,15—30 cm)进行采样。将采得的土壤样品装入自封袋,并进行标记后带回实验室进行分析测定。

### 1.3 土壤性质测定

土壤容重采用环刀法测定;土壤有机质采用外加热重铬酸钾容量法—外加热法<sup>[12]</sup>测定;pH 使用 pH 计(奥豪斯仪器有限公司—ST3100,中国)结合电位法测定(土:水=1:2.5);土壤机械组成采用激光粒度仪(马尔文仪器公司—MS2000,英国)测定。

土壤电化性质采用联合法<sup>[4]</sup>测定。黄土高原地区土壤中的碳酸盐含量较高,在测定前先对土壤进行脱钙处理。先称取 100 g 土样置于 1 L 的烧杯中,加入 0.5 mol/L 的 HCl 溶液,振荡 5 h 离心去除上清液,重复该过程 3 次,直至无 CO<sub>2</sub> 气体产生。随后样品中加入 1 L 的 0.1 mol/L HCl,振荡 5 h,离心去除上清液,重复该过程 3 次,完成最后 1 次离心后加入等体积纯水,重复土样振荡和离心的过程,即制备得到氢饱和样。取出土样放入烘箱中烘干(70℃,5 h),然

后过 0.25 mm 筛备用。称取 5 g 氢饱和样放置于 150 mL 的三角瓶中,加入 25 mL 0.01 mol/L 的 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液振荡 24 h,然后再加入同体积 0.01 mol/L 的 NaOH 溶液,再次振荡 24 h。振荡后用 1 mol/L HCl 溶液调节土壤悬液 pH,使土壤悬液 pH 保持在 7 左右。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Spectro—Arcos,德国)测定上清液 Ca<sup>2+</sup> 和 Na<sup>+</sup> 的浓度。土壤阳离子交换量(CEC)采用 NaOAc 法测定<sup>[12]</sup>,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Spectro—Arcos,德国)测定上清液 Na<sup>+</sup> 的浓度,计算土壤阳离子交换量(CEC)。土壤电化学性质参数计算公式为:

$$\varphi_0 = \frac{2RT}{2(\beta_{Ca} - \beta_{Na})} \ln \frac{a_{Ca}^0 N_{Na}}{a_{Na}^0 N_{Ca}}$$
$$\sigma_0 = \text{sgn}(\varphi_0) \sqrt{\frac{\epsilon RT}{2\pi} (a_{Na}^0 e^{\frac{\beta_{Na} F \varphi_0}{RT}} + a_{Ca}^0 e^{\frac{2\beta_{Ca} F \varphi_0}{RT}})}$$
$$E_0 = \frac{4\pi}{\epsilon} \sigma_0$$
$$S = \frac{N_{Na} \kappa}{ma_{Na}^0} e^{\frac{\beta_{Na} F \varphi_0}{2RT}} = \frac{N_{Ca} \kappa}{ma_{Ca}^0} e^{\frac{\beta_{Ca} F \varphi_0}{2RT}}$$

$CEC = \frac{\rho V}{m_2 \times 23} \times 10^{-3} \times 100$

$\beta_{Ca} = -0.0213 \ln(I^{0.5}) + 1.2331$

$\beta_{Na} = 2 - \beta_{Ca}$

$m = 0.5259 \ln \frac{C_{Na}^0 + C_H^0}{C_{Ca}^0} + 1.992$

$\kappa = \sqrt{4\pi F^2 \sum Z_i^2 a_i^0 / \epsilon RT}$

式中:CEC 为阳离子交换容量(cmol/kg); $\varphi_0$  为表面电势(mV); $\sigma_0$  为表面电荷密度(C/m<sup>2</sup>); $E_0$  为表面电场强度(V/m); $S$  为比表面积(m<sup>2</sup>/g); $R$  为理想气体常数(J/(K·mol)); $T$  为绝对温度(K); $F$  为法拉第常数(C/mol); $Z$  为每个离子种类的电荷; $\beta_{Na}$  和  $\beta_{Ca}$  分别为  $Z$  对 Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 的有效电荷系数; $\epsilon$  为水的介电常数( $8.9 \times 10^{-9}$  C<sup>2</sup>/(J·m)); $\kappa$ (d/m) 为 Debye—Hückel 参数; $I$  为离子强度(mol/L); $C_{Na}^0$  和  $C_{Ca}^0$  分别为本体溶液中的平衡 Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 的浓度(mol/L); $\rho$  为标准曲线上查得的待测液中钠离子的质量浓度( $\mu\text{g/mL}$ ); $V$  为测定时定容的体积(mL);23 为钠的摩尔质量(g/mol); $m_2$  为烘干质量(g)。

表 1 样地基本信息

| 样地代码 | 地坐标              | 海拔/m | 坡度/(°) | 土壤类型 | 优势种 | 植被覆盖度/% |
|------|------------------|------|--------|------|-----|---------|
| YA-1 | 108°07'E,34°50'N | 1279 | 15     | 黑垆土  | 铁杆蒿 | 75~80   |
| YA-2 | 108°07'E,34°50'N | 1284 | 18     |      |     |         |
| YA-3 | 108°07'E,34°50'N | 1225 | 15     |      |     |         |
| YB-1 | 108°07'E,34°50'N | 1239 | 13     |      | 长芒草 | 75~80   |
| YB-2 | 108°07'E,34°50'N | 1254 | 15     |      |     |         |
| YB-3 | 108°07'E,34°50'N | 1243 | 15     |      |     |         |
| YC-1 | 108°07'E,34°50'N | 1210 | 14     | 黄绵土  | —   | —       |
| YC-2 | 108°07'E,34°50'N | 1253 | 17     |      |     |         |
| YC-3 | 108°07'E,34°50'N | 1243 | 16     |      |     |         |
| AA-1 | 109°16'E,36°48'N | 1263 | 18     |      | 铁杆蒿 | 75~80   |
| AA-2 | 109°16'E,36°47'N | 1235 | 16     |      |     |         |
| AA-3 | 109°16'E,36°47'N | 1229 | 15     |      |     |         |
| AB-1 | 109°16'E,36°48'N | 1281 | 13     | 砂黄土  | 长芒草 | 75~80   |
| AB-2 | 109°16'E,36°48'N | 1258 | 15     |      |     |         |
| AB-3 | 109°16'E,36°48'N | 1249 | 14     |      |     |         |
| AC-1 | 109°16'E,36°48'N | 1251 | 15     |      | —   | —       |
| AC-2 | 109°16'E,36°48'N | 1231 | 14     |      |     |         |
| AC-3 | 109°16'E,36°48'N | 1240 | 17     |      |     |         |
| SA-1 | 110°22'E,38°47'N | 1222 | 13     |      | 铁杆蒿 | 75~80   |
| SA-2 | 110°22'E,38°47'N | 1224 | 15     |      |     |         |
| SA-3 | 110°22'E,38°47'N | 1219 | 15     |      |     |         |
| SB-1 | 110°22'E,38°47'N | 1228 | 15     |      | 长芒草 | 75~80   |
| SB-2 | 110°22'E,38°47'N | 1210 | 13     |      |     |         |
| SB-3 | 110°22'E,38°47'N | 1205 | 16     |      |     |         |
| SC-1 | 110°22'E,38°47'N | 1131 | 16     |      | —   | —       |
| SC-2 | 110°22'E,38°47'N | 1107 | 18     |      |     |         |
| SC-3 | 110°22'E,38°47'N | 1107 | 15     |      |     |         |

注:第 1 个字母表示土壤类型,即 Y—黑垆土(永寿梁),A—黄绵土(坊塌),S—砂黄土(六道沟);第 2 个字母表示主要植被类型,即 A—铁杆蒿,B—长芒草,C—退耕 1 年的撂荒地;每个采样点代码中的数字(1,2,3)表示每个处理中的重复。

1.4 数据处理

运用 Excel 2016 和 SPSS 22 软件对数据进行多重比较(LSD)( $p<0.05$ );用 Pearson 相关系数评价土壤基本理化性质与电化学性质的相关关系;运用 Canoco 5 软件对土壤基本理化性质与电化学性质进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

在 0—15 cm 土层,永寿塬土壤机械组成以粉粒为

主,占土壤颗粒机械组成的 63.36%,砂粒占 29.42%,其黏粒与粉粒显著高于坊塌及六道沟,砂粒含量显著低于坊塌及六道沟( $p<0.05$ )。坊塌和六道沟以砂粒为主,分别占土壤颗粒机械组成的 71.81%和 71.25%。3 个地区铁杆蒿样地与长芒草样地较撂荒地黏粉粒增加,砂粒减少,但仅六道沟达到显著性差异。15—30 cm 土层与 0—15 cm 土层基本一致,植被恢复样地黏粉粒含量高于撂荒地、砂粒含量小于撂荒地,但未表现出显著性差异(表 2)。

表 2 黄土高原典型植被群落对土壤理化性质的影响

| 土层<br>深度/cm | 样地  | 植被<br>类型 | 颗粒组成/%       |                 |               | 有机质/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | pH           |
|-------------|-----|----------|--------------|-----------------|---------------|-------------------------------|------------------------------|--------------|
|             |     |          | 黏粒           | 粉粒              | 砂粒            |                               |                              |              |
|             |     |          | (<0.002 mm)  | (0.02~0.002 mm) | (2~0.02 mm)   |                               |                              |              |
| 0—15        | 永寿塬 | 铁杆蒿      | 7.39±0.81Aa  | 64.33±2.37Aa    | 28.27±2.29Aa  | 53.39±6.34Aa                  | 0.94±0.05Bb                  | 7.57±0.12Bb  |
|             |     | 长芒草      | 7.65±0.80Aa  | 64.20±3.97Aa    | 28.14±4.77Aa  | 38.88±6.08Aab                 | 1.11±0.09Aab                 | 7.64±0.10Bab |
|             |     | 撂荒地      | 6.61±0.70Aa  | 61.56±5.10Aa    | 31.84±5.77Aa  | 27.07±2.01Ab                  | 1.30±0.14Ba                  | 7.81±0.02Ba  |
|             | 坊塌  | 铁杆蒿      | 3.53±0.37Ba  | 22.98±3.52Ba    | 73.49±3.88Ba  | 6.20±2.03Ba                   | 1.24±0.07Aa                  | 7.95±0.23Aa  |
|             |     | 长芒草      | 4.16±1.13Ba  | 27.15±5.79Ba    | 68.68±6.80Ba  | 8.12±5.41Ba                   | 1.26±0.15Aa                  | 7.95±0.15Aa  |
|             |     | 撂荒地      | 3.56±0.08Ba  | 23.18±0.64Ba    | 73.26±0.71Ba  | 8.64±1.42Ba                   | 1.27±0.12Ba                  | 7.86±0.06Ba  |
|             | 六道沟 | 铁杆蒿      | 3.52±0.21Bab | 26.53±5.06Bab   | 69.95±5.27Bab | 7.02±4.10Bab                  | 1.25±0.08Ab                  | 7.85±0.14ABb |
|             |     | 长芒草      | 4.32±0.94Ba  | 32.05±8.30Ba    | 63.63±9.22Bb  | 11.06±3.02Ba                  | 1.33±0.05Ab                  | 7.70±0.04Bb  |
|             |     | 撂荒地      | 2.61±0.40Cb  | 17.22±3.38Bb    | 80.17±3.77Ba  | 1.90±0.37Cb                   | 1.59±0.03Aa                  | 8.07±0.05Aa  |
|             | 永寿塬 | 铁杆蒿      | 6.79±0.17Aa  | 65.46±1.62Aa    | 27.75±1.75Ba  | 28.26±10.70Aa                 | 1.34±0.03Ab                  | 7.73±0.20Ba  |
|             |     | 长芒草      | 7.04±0.09Aa  | 62.96±0.31Aa    | 29.99±0.36Ba  | 19.28±4.62Aa                  | 1.41±0.05Aa                  | 7.78±0.06Ba  |
|             |     | 撂荒地      | 6.78±0.84Aa  | 65.45±5.50Aa    | 27.76±6.22Ba  | 8.61±1.31Aa                   | 1.42±0.01Ba                  | 7.95±0.07Aa  |
| 15—30       | 坊塌  | 铁杆蒿      | 3.52±0.33Ba  | 24.16±4.50Ba    | 72.32±4.82Aa  | 2.43±1.00Aa                   | 1.38±0.04Aa                  | 8.20±0.06Aa  |
|             |     | 长芒草      | 3.87±0.36Ba  | 29.46±3.81Ba    | 66.67±4.17Aa  | 2.79±0.13Ba                   | 1.39±0.17Aa                  | 8.12±0.05Aab |
|             |     | 撂荒地      | 3.39±0.10Ba  | 22.95±1.07Ba    | 73.66±1.10Aa  | 3.34±0.36Ba                   | 1.43±0.02Ba                  | 7.98±0.16Ab  |
|             | 六道沟 | 铁杆蒿      | 3.55±0.83Ba  | 32.72±9.57Ba    | 63.72±9.37Aa  | 2.88±1.64Aa                   | 1.47±0.19Aa                  | 7.90±0.13Ba  |
|             |     | 长芒草      | 3.78±0.47Ba  | 37.12±7.75Ba    | 59.10±7.12Aa  | 3.40±1.40Ba                   | 1.40±0.07Aa                  | 7.90±0.23ABa |
|             |     | 撂荒地      | 2.69±0.30Ba  | 18.80±3.19Ba    | 78.51±3.48Aa  | 2.14±0.20Ba                   | 1.59±0.04Aa                  | 8.18±0.10Aa  |

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示同一土层同一植被类型不同地区之间据差异显著( $p<0.05$ ),不同小写字母表示同一土层同一地区不同植被类型之间差异显著( $p<0.05$ )。

对于土壤有机质含量,3 个研究区之间的差异明显大于研究区内部差异。其中,永寿塬地区有机质含量显著大于坊塌及六道沟,其有机质的最小值(撂荒地)仍高于坊塌及六道沟的最大值。在 0—15 cm 土层,永寿塬及六道沟,植被恢复样地有机质显著大于撂荒地;坊塌地区未达到显著性差异。15—30 cm 土层土壤有机质表现与 0—15 cm 基本一致,但同一地区内植被恢复地与撂荒地均无显著性差异。

在 0—15 cm 土层,六道沟容重最高,坊塌次之,永寿塬地区最低。3 个地区撂荒地容重均高于植被恢复样地,其中永寿塬及六道沟表现出显著性差异;15—30 cm 土层与 0—15 cm 表现基本一致。在 0—15 cm 土层,研究区 pH 为 7.57~8.07。坊塌 pH 最高,六道沟次之,永寿塬最小,研究区之间 pH 差异较小。在永寿塬、六道沟铁杆蒿样地及长芒草样地 pH 显著低于撂荒地。15—30 cm 土层与 0—15 cm 土层

基本一致,3 个地区植被恢复样地与撂荒地之间均无显著性差异。

2.2 典型植被群落下土壤阳离子交换量的变化特征

由图 1 可知,对于 0—15 cm 土层,土壤阳离子交换量为 7.26~24.34 cmol/kg。永寿塬地区,铁杆蒿和长芒草群落分别是撂荒地 1.68,1.19 倍,铁杆蒿群落与撂荒地差异显著( $p<0.05$ );坊塌地区,铁杆蒿和长芒草群落与撂荒地无显著差异;六道沟地区,铁杆蒿和长芒草群落显著高于撂荒地( $p<0.05$ ),分别是其 2.02,1.61 倍。对于 15—30 cm 土层,土壤阳离子交换量为 6.69~17.48 cmol/kg。永寿塬地区长芒草群落下土壤阳离子交换量显著高于撂荒地;六道沟地区长芒草与铁杆蒿分别显著高于撂荒地。相比于撂荒地,典型植被群落下土壤阳离子交换量表现为永寿塬地区增量最多,而六道沟地区变化率最大,说明植被恢复促进阳离子交换量的增加,但其变化存在空间差异。

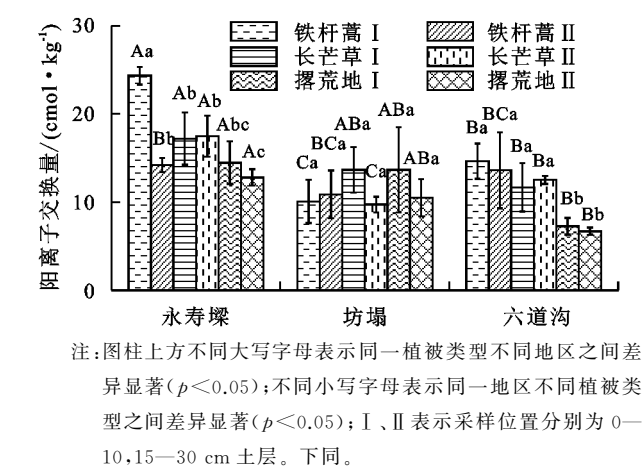


图1 黄土高原典型植被群落样地土壤阳离子交换量

2.3 典型植被群落下土壤比表面积的变化特征

由图2可知,在0—15 cm 土层,土壤比表面积为8.32~147.38 m<sup>2</sup>/g。永寿梁、坊塌及六道沟地区,铁杆蒿和长芒草群落下土壤比表面积分别是撂荒地的1.24,1.41倍,2.07,1.42倍和9.16,6.70倍,其中,神木地区2种典型植被均为显著变化( $p<0.05$ )。在15—30 cm 土层,土壤比表面积为7.29~182.29 m<sup>2</sup>/g。六道沟典型植被群落土壤比表面积显著高于撂荒地。六道沟地区典型植被群落下土壤比表面积的变化率最高,而永寿梁地区典型植物群落下土壤比表面积的增量最大,说明植被恢复可以促进土壤比表面积的增加且存在空间差异性。

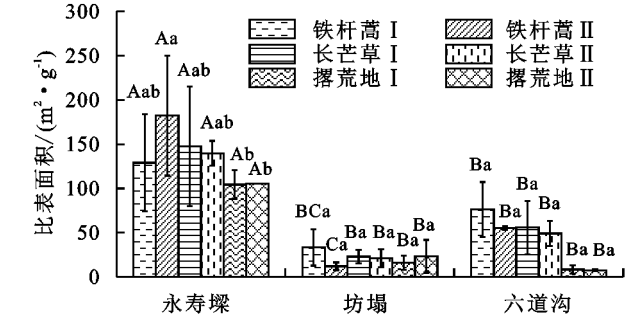


图2 黄土高原典型植被群落样地土壤比表面积

2.4 典型植被群落下土壤表面电荷密度的变化特征

随土层深度增加,土壤表面电荷密度无明显变化,为0.08~2.04 C/m<sup>2</sup>(图3)。永寿梁及坊塌地区,撂荒地土壤表面电荷密度分别是铁杆蒿和长芒草群落1.42,1.35倍和1.63,2.03倍,其差异未达到显著性水平;六道沟地区,撂荒地分别是铁杆蒿和长芒草群落的10.52,5.98倍,撂荒地土壤表面电荷密度显著高于铁杆蒿和长芒草群落( $p<0.05$ )。不同研究区土壤表面电荷密度均表现为植被群落样地<撂荒地,说明植被恢复可以促使土壤表面电荷密度的降低,但仅六道沟地区达到显著性差异。

2.5 典型植被群落下土壤表面电场强度的变化特征

随土层深度增加,土壤表面电场强度无明显变化,其变化范围为1.11~28.46 10<sup>8</sup> V/m(图4)。永寿梁及坊

塌地区,撂荒地表面电场强度分别是铁杆蒿和长芒草群落1.42,1.35倍和1.63,2.03倍,其差异未达到显著性水平;六道沟地区,撂荒地分别是铁杆蒿和长芒草群落的10.05,5.98倍,撂荒地表面电场强度显著高于铁杆蒿和长芒草群落( $p<0.05$ )。不同研究区土壤表面电荷密度和表面电场强度均表现为植被群落样地<撂荒地,说明植被恢复可以促使土壤表面电荷密度和表面电场强度的降低,且对六道沟的影响最为显著。

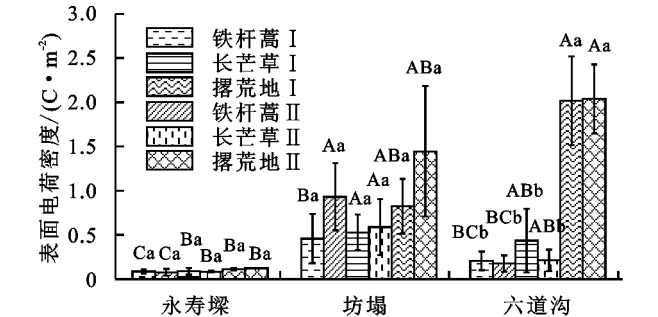


图3 黄土高原典型植被群落样地土壤表面电荷密度

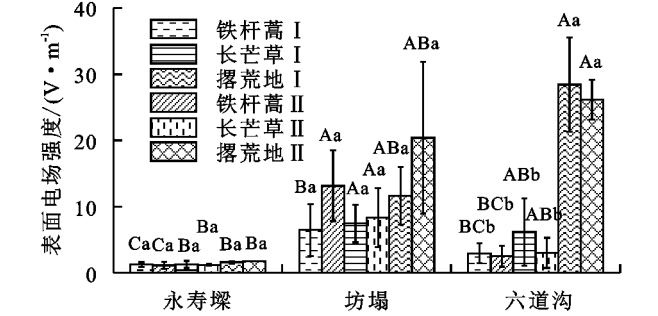


图4 黄土高原典型植被群落样地土壤表面电场强度

3 讨论

3.1 植被对土壤表面电化学性质的影响

本研究表明,植被生长可以促进土壤阳离子交换量及比表面积的增加,表面电荷密度和表面电场强度的减小。陈晶晶<sup>[6]</sup>和马任甜等<sup>[13]</sup>得到了相似的结果,并提出这种变化可能是植被恢复过程中有机质与黏粉粒含量的显著变化所导致。植被恢复可以减少雨滴击溅和径流冲刷,减少黏粉粒的损失以及形成稳定的成土环境,增强了土壤黏化作用,使土壤的黏粉粒含量增加,砂粒含量减少<sup>[14]</sup>。此外,植物恢复过程中还可以通过枯枝落叶及根系分泌物增加土壤碳含量,并减少分解和侵蚀的有机质损失,以此来增加土壤有机质的含量<sup>[8,15]</sup>。

本研究中,土壤表面电化学性质与理化性质具有很好的相关性(表3),且粉粒含量和有机质含量是电化学性质的变化的主要贡献者,对电化学性质变化的解释方差为61.0%,11.1%(图5),与马任甜等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。通常情况下,土壤颗粒中细颗粒(黏粒和粉粒)含量越高,土壤颗粒的比表面积就越大,表面吸附的电荷数量就越多<sup>[16]</sup>。而有机质(以腐殖质为主)可以通过其官能团的解离产生可变负电荷,使

土壤表面电荷数量增加;且有机质由三维多聚相组成,具有较高的内表面积,因此,土壤有机质含量越高,土壤比表面积越大<sup>[5]</sup>;随着有机质含量的增加,大量有机质胶体被土壤颗粒表面的吸附力固持于土壤细颗粒的表面,颗粒间双电层结构被充分压缩,使得土壤颗粒表面电荷密度降低<sup>[17]</sup>。因此,本研究中有有机质含量及黏粉粒含量(其中神木地区达到显著变化)的提高,是植被改变土壤电化学性质的重要原因。

在同种土壤类型下(黄绵土),本研究中铁杆蒿和长芒草的土壤阳离子交换量、比表面积与马任甜等<sup>[13]</sup>研究的草本植物白羊草(15.54 cmol/kg,53.01 m<sup>2</sup>/g)结果相似,低于沙棘、山杨、白桦、辽东栎(16.60~19.52 cmol/kg,55.3~61.39 m<sup>2</sup>/g)等乔灌木研究结果。其可归因于乔灌木具有更长的演替时间及更高的细根生产周转率<sup>[18]</sup>,植物根系可通过分泌有机质及固结或富集土壤中的黏粒和粉粒,从而对土壤阳离子交换量及比表面积产生不同的影响<sup>[7]</sup>。此外,土壤阳离子交换量是土壤肥力

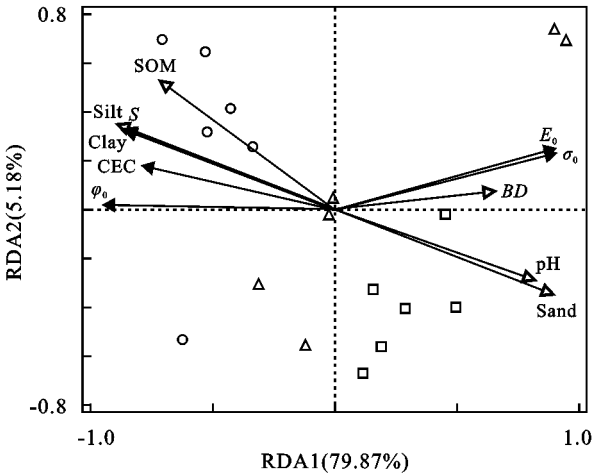
的重要特征之一,是土壤质量变化、保肥、供肥能力、和酸碱缓冲能力的重要标志<sup>[5]</sup>,也是改良土壤和合理施肥的重要依据之一,因此,土壤阳离子交换量的增加与植被生长呈正向作用。

此外,本研究表明,土壤表面电化学性质(土壤阳离子交换量与比表面积)与 pH 呈现显著负相关关系(表 3)。土壤 pH 变化和土壤有机酸有关,而植物被恢复过程中根系的分泌物以及植物残体分解都会引起土壤有机酸的富集,促使土壤 pH 降低<sup>[19]</sup>。余正洪等<sup>[20]</sup>研究表明,随着 pH 的降低,可变电荷土壤(红壤和黄壤)及恒电荷土壤(紫色土)表面阳离子交换量与比表面积显著减小,是因为其试验是通过设定不同土壤 pH 环境来测定土壤电化学性质的。本研究中的 pH 用以表征土壤本身的酸碱情况,而同一土壤类型下土壤 pH 差异较小,且土壤电化学性质主要受有机质含量及土壤机械组成的影响,故呈现不同的结果,这与黄土高原子午岭地区 Liu 等<sup>[5]</sup>的相关研究结果一致。

表 3 土壤理化性质和土壤电化学性质的相关性

| 指标         | Clay    | Silt    | Sand    | pH      | SOM     | BD      | CEC     | S       | $\sigma_0$ |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| Silt       | 0.96**  |         |         |         |         |         |         |         |            |
| sand       | -0.98** | -0.99** |         |         |         |         |         |         |            |
| pH         | -0.61** | -0.59** | 0.60**  |         |         |         |         |         |            |
| SOM        | 0.77**  | 0.71**  | -0.72** | -0.75** |         |         |         |         |            |
| BD         | -0.45** | -0.36** | 0.37**  | 0.49**  | -0.60** |         |         |         |            |
| CEC        | 0.69**  | 0.67**  | -0.66** | -0.66** | 0.71**  | -0.57** |         |         |            |
| S          | 0.77**  | 0.77**  | -0.77** | -0.62** | 0.70**  | 0.02    | 0.57**  |         |            |
| $\sigma_0$ | -0.54** | -0.57** | 0.57**  | 0.42**  | -0.38** | 0.42**  | -0.54** | -0.55** |            |
| $E_0$      | -0.54** | -0.57*  | 0.57**  | 0.41**  | -0.39** | 0.41**  | -0.53** | -0.55** | 0.99*      |

注:Clay、Silt、Sand、SOM、BD、CEC、S、 $\sigma_0$ 、 $E_0$ 分别代表黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、土壤有机质、容重、阳离子交换量、比表面积、表面电荷密度、表面电场强度; \*\* 表示  $p<0.01$ , \* 表示  $p<0.05$ 。



注:CEC、S、 $\sigma_0$ 、 $E_0$ 、 $\varphi_0$ 、Clay、Silt、Sand、SOM、BD 分别表示阳离子交换量、比表面积、表面电荷密度、表面电场强度、表面电势、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、土壤有机质、容重。

质存在差异。永寿塬地区土壤阳离子交换量及比表面积的增量最大,而六道沟土壤阳离子交换量、比表面积、表面电荷密度、表面电场强度的变化率最大,可能受到水分条件、土壤类型及土壤侵蚀等因素的影响。黄土高原水分条件南北分异是造成植物地上生物量、细根生物量差异的重要原因<sup>[10]</sup>。其中,黄土丘陵沟壑区由南到北(降水 558.4~389.6 mm)细跟生物量为 4.26~1.49 kg/m<sup>3</sup><sup>[21]</sup>,而地上生物量和细根生物量及其周转与有机质密切相关,随地上生物量及细根生物的增加有机质显著增加<sup>[22-23]</sup>;此外,有机质与土壤质地密切相关,3 个研究区位于不同的土壤类型区,土壤机械组成有较大差异(表 2),而砂粒含量占比越大越,不利于有机质的积累<sup>[24]</sup>。因此,黄土高原地区有机质呈现由南至北递减趋势。已有研究<sup>[6]</sup>表明,有机质是植被影响土壤表面电化学性质的重要原因,一般情况随着有机质的增加土壤阳离子交换量、比表面积增加,表土壤面电场强度和表面电势减小。因而,水分条件和土壤类型的空间差异,造成了植被对表面电化学性质影响的空间差异。

图 5 土壤理化性质与表面电化学性质的 RDA 排序

3.2 不同植被群落对土壤表面电化学性质影响的空间差异

同一植被群落下,不同研究区土壤表面电化学性

本研究中,永寿塬地区位于黄土高原南部,年均降水量、黏粒粉粒显著高于其他 2 个地区,因此,永寿塬的有机质增量最大(表 2),可能是永寿塬地区土壤表面电化学性质具有较高增量的原因。六道沟地区位于黄土高原北部风蚀水蚀交错带,土壤侵蚀严重<sup>[25]</sup>,土壤含沙量高于永寿塬及坊塌地区,使得有机质的更易损失而不易积累,因此,撂荒地有机质含量显著低于坊塌及永寿塬地区(表 2)。植被恢复降低了土壤侵蚀强度<sup>[14]</sup>,促使有机质含量及黏粉粒相较撂荒地的显著增加(六道沟地区 0—15 cm 长芒草群落有机质含量是撂荒地的 5.82 倍,黏粉粒是撂荒地的 1.83 倍),是六道沟地区土壤表面电化学性质具有较大变化率的重要原因。

## 4 结 论

(1)黄土高原地区典型植被群落生长可有效改变土壤理化性质,提高土壤黏粒、粉粒、有机质含量,降低土壤 pH、容重、砂粒含量。

(2)同一区域内,相较于撂荒地,典型植被群落的土壤阳离子交换量、土壤比表面积增加,土壤表面电荷密度及土壤表面电场强度减小。不同区域间,同一植被群落对土壤表面电化学性质的影响呈现空间差异性,其中,土壤表面电化学性质在黄土高原南部永寿塬地区的增量最大,而黄土高原北部六道沟地区的变化率最高。

(3)黄土高原典型植被群落下土壤理化性质变化可以较好解释土壤表面电化学性质的变化,粉粒含量和有机质含量是影响土壤表面电化学性质最重要的因素。

参考文献:

[1] 李小雁.干旱地区土壤—植被—水文耦合、响应与适应机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1721-1730.

[2] 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.

[3] Yu Z H, Li H, Liu X M, et al. Influence of soil electric field on water movement in soil [J].Soil and Tillage Research,2016,155:263-270.

[4] 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.

[5] 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:e104526.

[6] 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[D].重庆:西南大学,2014.

[7] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-

273,298.

[8] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's Grain-for-Green Program: A synthesis [J].Global Change Biology,2014,20(11):3544-3556.

[9] 于天仁.土壤的电化学性质及其研究法[M].北京:科学出版社,1976.

[10] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J].Ecological Complexity,2011,8(4):284-293.

[11] 李玉进,胡澍,焦菊英,等.黄土丘陵区不同侵蚀环境下土壤有机碳对植被恢复的响应[J].生态学报,2017,37(12):4100-4107.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[13] 马任甜,胡斐南,刘婧芳,等.黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化学性质演变特征[J].土壤学报,2020,57(2):392-402.

[14] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J].Geoderma,2018,325:18-27.

[15] Ghafoor A, Poeplau C, Kätterer T. Fate of straw- and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil [J].Biology and Fertility of Soils,2017,53(2):257-267.

[16] 龚燕.土壤电场与机械组成耦合作用下的土壤水入渗[D].重庆:西南大学,2018.

[17] 黄学茹,李航,李嵩,等.土壤电场与有机大分子的耦合对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤学报,2013,50(4):734-742.

[18] Deng L, Shangguan Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China [J].Land Degradation and Development,2016,28:151-165.

[19] 杨宁,邹冬生,杨满元,等.衡阳紫色土丘陵区不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系[J].应用生态学报,2013,24(1):90-96.

[20] 余正洪,刘新敏,李航.红壤黄壤及紫色土表面电荷性质的研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(3):62-66.

[21] 李俊超,郭胜利,党廷辉,等.黄土丘陵区不同退耕方式土壤有机碳密度的差异及其空间变化[J].农业环境科学学报,2014,33(6):1167-1173.

[22] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11):3979-3987.

[23] 孙龙,张光辉,栾莉莉,等.黄土丘陵区表层土壤有机碳沿降水梯度的分布[J].应用生态学报,2016,27(2):532-538.

[24] 葛楠楠,石芸,杨宪龙,等.黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J].应用生态学报,2017,28(5):1626-1632.

[25] 高宇,樊军,彭小平,等.水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J].生态学报,2014,34(23):7038-7046.