

DOI:10.11686/cyxb2024307

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

陈薪宇, 邓正昕, 王子芳, 等. 铵态氮肥施用量对不同类型紫色土氮淋失及表面电化学性质的影响. 草业学报, 2025, 34(7): 69—82.

CHEN Xin-yu, DENG Zheng-xin, WANG Zi-fang, *et al.* The impact of ammonium nitrogen fertilizer application rates on nitrogen leaching and surface electrochemical properties of various purple soils. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 69—82.

铵态氮肥施用量对不同类型紫色土氮淋失及表面电化学性质的影响

陈薪宇, 邓正昕, 王子芳, 谢军, 代文才, 高明*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 氮肥施用对世界粮食生产及保障我国粮食安全产生了巨大的作用, 为了阐明不同铵态氮肥施用量对不同类型紫色土氮淋失和表面电化学性质的影响, 采用盆栽试验, 选取3种不同类型的紫色土, 设置不施氮肥(CK)、低氮量(N_1 , 每 kg 土 0.1 g 纯氮)、中氮量(N_2 , 每 kg 土 0.2 g 纯氮)和高氮量(N_3 , 每 kg 土 0.4 g 纯氮)4个处理。结果表明: 随着氮肥施用量增加, 与对照组(CK)相比, N_3 处理下红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土的 pH 值分别下降了 0.9、1.2 和 0.8。同时, 这3种土壤的铵态氮和硝态氮累计淋失量均显著增加 ($P < 0.05$), N_3 处理铵态氮淋失量较对照组(CK)处理分别提升 7.1、15.4 和 12.5 倍, CK 处理的硝态氮几乎无淋失, N_3 处理的硝态氮淋失量较 N_1 处理分别提升 6.1、4.9 和 1.8 倍 ($P < 0.05$)。3种紫色土的表面电位(φ_0)、表面电场强度(E_0)和表面电荷密度(σ_0)均呈相似增长趋势, 而比表面积(S)和表面电荷数量(SCN)则下降 ($P < 0.05$)。在相同氮肥施用量下, 不同类型紫色土的氮淋失和表面电化学性质变化存在差异。在 N_3 处理下, 灰棕紫泥土铵态氮累积淋失量显著大于另外两种类型紫色土, 而在所有氮肥处理下, 灰棕紫泥土的硝态氮累积淋失量显著高于红棕紫泥土 ($P < 0.05$); 在 N_1 处理下, 灰棕紫泥土的 φ_0 较高, 但在 N_3 处理下, 棕紫泥土的 φ_0 显著高于其他两种土壤类型。在所有处理下, 灰棕紫泥土的 E_0 显著高于其他两种土壤 ($P < 0.05$); 在 N_2 和 N_3 处理下, 灰棕紫泥土的 σ_0 也显著高于其他两种土壤类型 ($P < 0.05$)。 S 在 N_1 、 N_2 和 N_3 处理中的表现为红棕紫泥土 > 棕紫泥土 > 灰棕紫泥土。在 N_3 处理下, 红棕紫泥土的 SCN 显著高于其他两种土壤类型 ($P < 0.05$)。因此, 过量施用铵态氮肥会导致紫色土的土壤酸化, 显著改变其表面电化学性质, 降低对养分的吸附和保持能力。

关键词: 铵态氮肥; 紫色土; 氮淋失; 土壤表面电化学性质

The impact of ammonium nitrogen fertilizer application rates on nitrogen leaching and surface electrochemical properties of various purple soils

CHEN Xin-yu, DENG Zheng-xin, WANG Zi-fang, XIE Jun, DAI Wen-cai, GAO Ming*

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Nitrogen fertilizer application plays an important role in world food production and in ensuring food security in China. To elucidate the effects of different ammonium nitrogen fertilizer application rates on nitrogen leaching and surface electrochemical properties of various types of purple soil, a pot experiment was conducted. Three different types of purple soil were selected, and four treatments were set up: no nitrogen fertilizer (CK), low nitrogen (N_1 , 0.1 g elemental nitrogen per kg soil), medium nitrogen (N_2 , 0.2 g elemental nitrogen per kg soil), and high

收稿日期: 2024-07-31; 改回日期: 2024-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177019)资助。

作者简介: 陈薪宇(2001—), 女, 重庆人, 在读硕士。E-mail: cxy010414@email.swu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gaoming@swu.edu.cn

nitrogen (N_3 , 0.4 g elemental nitrogen per kg soil). The results showed that with increasing nitrogen fertilizer application rates, compared with the control group (CK), the pH values of red brown purple soil, gray brown purple soil, and brown purple soil under the N_3 treatment decreased by 0.9, 1.2, and 0.8, respectively. Meanwhile, the cumulative leaching losses of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in these three types of soil increased significantly ($P < 0.05$). The ammonium nitrogen leaching losses under the N_3 treatment increased by 7.1, 15.4, and 12.5 times compared with those under the control (CK) treatment, respectively. There was almost no nitrate nitrogen leaching loss in the CK treatment. The nitrate nitrogen leaching losses under the N_3 treatment increased by 6.1, 4.9, and 1.8 times compared with those under the N_1 treatment, respectively ($P < 0.05$). The surface potential (φ_0), surface electric field strength (E_0), and surface charge density (σ_0) of the three types of purple soil showed similar increasing trends, while the specific surface area (S) and surface charge number (SCN) decreased. Under the same nitrogen fertilizer application rates, there were differences in nitrogen leaching and surface electrochemical properties among the different types of purple soil. In the N_3 treatment, the cumulative leaching of ammonium nitrogen in gray-brown purple soil was significantly higher than that in the other two types of purple soil. Additionally, under all nitrogen fertilizer treatments, the cumulative total amount of nitrate nitrogen leached in gray-brown purple soil was significantly higher than that in red-brown purple soil ($P < 0.05$). Under the N_1 treatment, φ_0 of gray-brown purple soil was higher, while under the N_3 treatment, φ_0 of brown purple soil was significantly higher than that of the other two soil types. Under all treatments, the E_0 of gray-brown purple soil was significantly higher than that of the other two soil types ($P < 0.05$). Furthermore, under the N_2 and N_3 treatments, the σ_0 of gray-brown purple soil was also significantly higher than that of the other two soil types ($P < 0.05$). S under the N_1 , N_2 , and N_3 treatments ranked: red-brown purple soil > brown purple soil > gray-brown purple soil. Under the N_3 treatment, SCN of red-brown purple soil was significantly higher than that of the other two soil types ($P < 0.05$). Therefore, excessive application of ammonium nitrogen fertilizer can lead to soil acidification in purple soils, significantly altering their surface electrochemical properties and reducing their ability to adsorb and retain nutrients.

Key words: ammonium nitrogen fertilizer; purple soil; nitrogen leaching; surface electrochemical properties of soil

在农业生产中,氮肥是提高作物产量的关键因素之一,铵态氮肥是较为常见的氮源。然而,氮肥的过量使用,尤其是铵态氮肥,不仅降低了氮肥利用效率,还引发了一系列环境问题,如土壤酸化、养分淋失和地下水污染^[1]。有研究表明,随着氮肥施用量的增加,土壤铵态氮和硝态氮的淋溶量均显著上升^[2-3]。因此,探究不同类型土壤上施用不同数量的氮肥对氮的淋失及土壤性质的影响,有利于农业的绿色发展和环境保护。

过量施用氮肥会改变土壤胶体的表面电学性质进一步影响土壤对养分的固定作用^[4-5]。植物在吸收铵态氮过程中释放出氢离子,它会与土壤颗粒上的负电荷发生交换,改变土壤的离子交换能力并降低土壤的pH值,同时土壤的硝化过程会将铵态氮转化为硝态氮,这种形式的氮素易被淋溶,从而造成氮素流失^[6]。余沛等^[7]采用室内土柱模拟试验,研究了不同氮肥施用量对砖红壤硝态氮和盐基离子淋溶特征的影响,结果表明,随着氮肥施用量的增加土壤硝态氮淋失量存在明显差异,土壤盐基离子的淋失也存在一定差异。

养分离子的转化和淋溶与土壤胶体的吸附能力显著相关,溶解的铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)作为植物可利用的无机氮一般被吸附于土壤胶体表面^[8]。土壤胶体的电学性质如土壤表面电荷数量、表面电荷密度、表面电位值、电场强度和比表面积,在微观尺度上对于理解土壤中物理化学反应的机制至关重要^[9-11],能较好地反映土壤的肥力水平、保肥缓冲能力。土壤内部是一个强电场体系,土壤铵根离子的硝化、氢离子的吸附、硝酸根离子以及盐基离子的淋失等必定受到土壤中电场的控制^[12-13]。长期施用铵态氮肥可能导致土壤颗粒之间的黏附力改变,从而改变比表面积。此外,铵态氮肥的施用会影响土壤的表面电位,增加的正电荷使得土壤颗粒的表面电位向正电荷方向偏移,这种变化可能进一步影响土壤的离子交换能力和养分的有效性^[14]。有研究表明,缓释

复合肥相较化肥能匀速释放多种形态氮素和丰富的有机质,提升碱性土壤表面电荷密度,最终提高土壤保肥供肥能力^[15]。然而,不同铵态氮肥施用量对土壤表面电化性质的影响及作用机制尚不清楚。

紫色土作为中国西南地区主要的农业土壤类型之一,在我国农业生产中占有重要地位,具有成土快和矿质养分丰富等特征^[16]。不同有机质、pH、黏粒含量和黏土矿物组成使得不同类型紫色土表面电化性质不同。有研究表明,3种典型紫色母岩发育的不同类型的紫色土,即棕紫泥土、红棕紫泥土、灰棕紫泥土的胶体表面电化性质存在显著差异^[17]。在铵态氮肥施用条件下,不同母质发育紫色土表面电化性质的变化特征也不明确。

鉴于此,本研究旨在探索不同施用量的铵态氮肥对不同类型紫色土氮淋失及土壤表面电化性质的影响,旨在探究不同土壤类型紫色土对氮的吸附保肥能力及铵态氮肥对紫色土表面电化性质的影响,为科学施肥和土壤养分管理提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于重庆市北碚区西南大学“国家紫色土肥力与肥料效益监测基地”(N 29°48′50",E 106°24′43"),海拔为 266.3 m,年平均气温为 18.3 ℃。属于亚热带季风湿润气候,年降水量为 1086.6 mm,年日照时数为 1276.7 h。

1.2 供试材料

供试土壤:选取广泛分布于四川盆地的 3 种紫色土(红棕紫泥土、灰棕紫泥土、棕紫泥土),采集地点为重庆市铜梁区(E 106°0′56",N 29°8′44")和綦江区(E 106°0′42",N 29°49′36")。采集 0~20 cm 土层的土壤放置于阴凉干燥处,经自然风干后,去除砾石、动植物残体,再碾碎过 2 mm 筛,用于盆栽试验。供试土壤的基本性质见表 1 和表 2。

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the test soil

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol·kg ⁻¹)	碳酸钙 CaCO ₃ (g·kg ⁻¹)
红棕紫泥土 Red-brown purple soil	8.6	20.15	1.14	14.22	55.51	3.46	11.62	25.74	62.95
灰棕紫泥土 Gray-brown purple soil	8.0	14.59	1.12	13.91	97.64	6.82	13.40	23.18	19.10
棕紫泥土 Brown-purple soil	8.4	15.21	0.89	7.48	88.18	6.69	14.93	15.47	37.85

表 2 供试土壤的机械组成

Table 2 Mechanical composition of the test soil (%)

土壤类型 Soil type	黏粒 Clay (<0.002 mm)	粉粒 Silt (0.002~0.050 mm)	砂粒 Sand				极粗砂粒 Very coarse sand (1~2 mm)
			极细砂粒 Very fine sand (0.05~0.10 mm)	细砂粒 Fine sand (0.10~0.25 mm)	中砂粒 Medium sand (0.25~0.50 mm)	粗砂粒 Coarse sand (0.5~0.1 mm)	
红棕紫泥土 Red-brown purple soil	38.20	47.99	5.94	1.28	0.39	0.00	0.00
灰棕紫泥土 Gray-brown purple soil	28.90	46.40	11.56	7.22	0.83	0.00	0.00
棕紫泥土 Brown-purple soil	22.06	27.29	11.30	20.70	13.85	1.39	0.00

1.3 试验设计

本试验选取上述 3 种不同类型的紫色土,氮肥种类为硫酸铵,设置 4 个施肥梯度,包括:1)不施氮肥(CK);2)

低氮量(N₁, 每 kg ± 0.1 g 纯氮); 3) 中氮量(N₂, 每 kg ± 0.2 g 纯氮); 4) 高氮量(N₃, 每 kg ± 0.4 g 纯氮)。3 种土壤, 4 个施肥梯度, 每个处理重复 3 次, 共 36 个盆。盆规格为顶部直径 27.0 cm, 底部直径 24.5 cm, 高度 18.0 cm, 底部有 6 个约 1 cm 直径的小孔, 在底部放两层纱布, 纱布之上放置约 5 cm 厚的石英砂, 随后装约 7 kg 过 2 mm 筛的土壤。将肥料与土壤混匀后, 浇蒸馏水保持土壤含水量为田间持水量的 60%。试验共进行 1 年, 种植 3 季蔬菜。其中第 1 季(2022 年 3—6 月)种植辣椒(*Capsicum annuum*), 第 2 季(2022 年 6—9 月)种植小白菜(*Brassica campestris* ssp. *chinensis* var. *communis*), 第 3 季(2022 年 10 月至 2023 年 1 月)种植莴笋(*Lactuca sativa* var. *angustata*)。试验中磷肥一次性基施, 氮肥和钾肥则按照基肥—追肥—追肥分 3 次施用(50%—25%—25%), 移栽后每隔 30 d 进行一次追肥。肥料具体施用量见表 3。

淋溶试验于 2022 年 11 月至 2023 年 1 月(莴笋季)进行, 采用间歇淋溶法。分别在第 1 次和第 2 次追肥约 1 周之后进行两个周期的淋溶试验, 每次追肥后的一个月淋溶 6 次, 每次淋溶间隔 4 d, 共计淋溶 12 次, 第 1 次淋溶液均舍弃。用 I₂、I₃、I₄、I₅、I₆、II₂、II₃、II₄、II₅、II₆ 表示两个周期各 5 个淋溶阶段。首次淋溶前加入适量的蒸馏水使土壤达到饱和状态, 每次淋溶加入 800 mL 纯水。每次收集淋溶液后立即送至实验室测定铵态氮、硝态氮。

土样采集: 植株收获后的一个星期, 于 2023 年 2 月 2 日进行破坏性取样, 采集的新鲜土样用于测定土壤硝态氮和铵态氮等, 剩余部分土样置于室外自然风干, 然后去除杂质, 研磨后分别过 1.00 和 0.25 mm 筛, 用于测定土壤理化性质和土壤表面电化学性质。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤和淋溶液理化性质的测定 测定方法参照文献[18], pH 值测定采用 DMP-2mV 酸度计(上海, 土水比为 1.00:2.50); 阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)测定采用 K₂C₂O₄-火焰光度法; 土壤有机质(soil organic matter, SOM)测定采用重铬酸钾容量法; 总氮(total nitrogen, TN)测定采用 H₂SO₄消煮—凯氏定氮法; NH₄⁺-N 测定采用 KCl 浸提—靛酚蓝比色法; NO₃⁻-N 测定采用 KCl 浸提—紫外分光光度法。

1.4.2 土壤表面电化学性质测定 由于选取的土样含碳酸盐较高, 在制备氢饱和样前需对土壤样品进行脱钙处理, 分别称取过 0.25 mm 筛孔的 3 种风干后的石灰性紫色土 200 g 于 2 L 烧杯中, 缓慢加入 0.5 mol·L⁻¹ HCl 溶液 1 L, 用玻璃棒搅拌均匀, 振荡 5 h, 以 3000 r·min⁻¹ 离心 10 min 弃上清液。继续加入 HCl 溶液, 重复上述操作 3 次, 直至土样中无 CO₂ 气泡产生。将脱钙后的土壤样品移入 5 L 大烧杯中, 加入 0.1 mol·L⁻¹ HCl 溶液 2 L, 搅拌 5 h, 离心弃上清液。继续加入 HCl 溶液, 重复上述操作 3 次。最后一次离心后, 加入同样体积的去离子水, 重复上述的振荡和离心过程, 得到的样品即为氢饱和样。再将土样在 60 °C 温度条件下烘干, 用瓷钵研磨过 0.25 mm 筛, 装袋备用。

根据 Li 等^[19]提出的表面性质联合测定法, 选取 Na⁺ 和 Ca²⁺ 作为指示离子。配制 0.0075 mol·L⁻¹ NaOH-Ca(OH)₂ 混合溶液, 取 40 mL 该溶液与 5 g 氢饱和土壤样品混合, 恒温振荡后离心测定上清液中的 Na⁺ 和 Ca²⁺ 浓度。将其代入到计算公式。

土壤表面电位(soil surface potential, φ_0):

$$\varphi_0 = \frac{2RT}{2(\beta_{Ca} - \beta_{Na})} \ln \frac{a_{Ca}^0 N_{Na}}{a_{Na}^0 N_{Ca}} \quad (1)$$

土壤表面电荷密度(soil surface charge density, σ_0):

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

表 3 各处理单季肥料施用量

Table 3 Fertilizer application rate per season for each treatment (g·pot⁻¹)

处理 Treatment	硫酸铵 Ammonium sulfate	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Potassium chloride
CK	—	6.67	2.67
N ₁	1.9	6.67	2.67
N ₂	3.8	6.67	2.67
N ₃	7.6	6.67	2.67

“—”表示无数据。“—” indicates no data.

土壤表面电场强度(soil surface electric field strength, E_0):

$$E_0=\frac{4\pi}{\epsilon}\sigma_0$$

(3)

土壤比表面积(soil specific surface area, S):

$$S=\frac{N_{Na}\kappa}{ma_{Na}^0}e^{\frac{\beta_{Na}F_{\varphi_0}}{2RT}}=\frac{N_{Ca}\kappa}{ma_{Ca}^0}e^{\frac{\beta_{Ca}F_{\varphi_0}}{RT}}$$

(4)

土壤表面电荷数量(soil surface charge number, SCN):

$$SCN=10^5\frac{S\sigma_0}{F}$$

(5)

式中: R 是通用气体常数; T 是绝对温度; F 是法拉第常数; β_{Na} 和 β_{Ca} 分别为 Na^+ 和 Ca^{2+} 的有效电荷系数; a_{Na}^0 、 a_{Ca}^0 为溶液中 Na^+ 和 Ca^{2+} 活度; N_{Na} 和 N_{Ca} 为土壤中 Na^+ 和 Ca^{2+} 的吸附量; ϵ 是水的介电常数; κ 是Debye-Hückel参数。

1.4.3 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N离子累积淋溶量计算

$$L_i=\frac{\sum_{j=1}^{10}C_{ij}\times V_{ij}}{10^3\times 10^6}\times \frac{10^8}{S}$$

式中: L_i 为某离子累积淋溶量; C_{ij} 为*i*处理第*j*次淋溶试验淋溶液中离子质量浓度; V_{ij} 为*i*处理第*j*次淋溶试验淋溶液体积(mL); S 为盆栽横截面积^[20]。

1.5 数据处理

采用SPSS 23.0软件对数据进行统计分析,采用Duncan新复极差法($P<0.05$)进行显著性分析;分别采用Excel 2016和Origin 2022进行数据基础处理和作图。利用Canoco 5.0进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)研究土壤基本性质对表面电荷性质的影响。

2 结果与分析

2.1 铵态氮肥施用量对不同类型紫色土pH及养分含量的影响

由表4可知,在不同铵态氮肥施用量下,红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土的pH值均随施氮量的增加而显

表 4 铵态氮肥施用对不同类型紫色土 pH 及养分含量的影响

Table 4 Effect of ammonium nitrogen fertilizer application on pH and nutrient content of different types of purple soil

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量 Cation exchange ca- pacity (cmol·kg ⁻¹)
红棕紫泥土 Red-brown purple soil	CK	8.3±0.04a	19.98±0.31c	1.17±0.008c	90.2±4.6d	3.77±0.16b	25.45±0.26a
	N ₁	8.2±0.04a	22.73±0.35b	1.15±0.013c	103.3±6.6c	3.16±0.22c	22.84±1.27b
	N ₂	7.8±0.06b	22.58±0.32b	1.24±0.019b	176.1±11.8b	3.31±0.14c	19.41±0.39c
	N ₃	7.4±0.05c	23.92±1.00a	1.39±0.034a	225.3±21.8a	4.34±0.26a	16.00±0.97d
灰棕紫泥土 Gray-brown purple soil	CK	8.0±0.08a	15.96±0.31b	0.99±0.032c	57.2±4.4c	5.28±0.17b	22.14±0.80a
	N ₁	7.4±0.05b	19.24±1.60a	1.09±0.009b	65.0±2.6b	5.76±0.10a	19.38±0.84b
	N ₂	7.1±0.03c	16.24±0.38b	1.16±0.043a	74.8±2.8a	3.52±0.11c	16.85±0.96c
	N ₃	6.8±0.02d	13.43±0.76c	1.17±0.015a	77.1±2.8a	3.82±0.14c	10.90±0.58d
棕紫泥土 Brown-purple soil	CK	7.8±0.03a	16.49±0.49b	0.66±0.034d	56.9±2.1d	4.05±0.30c	12.54±0.50a
	N ₁	7.6±0.02a	19.19±0.13a	0.75±0.020c	89.4±2.4c	5.82±0.81a	11.16±0.36b
	N ₂	7.3±0.02b	19.44±0.30a	0.86±0.012b	104.1±3.5b	3.82±0.18c	10.87±0.04c
	N ₃	7.0±0.07c	17.07±0.67b	1.05±0.022a	121.0±8.2a	4.91±0.15b	9.73±0.40d

注:组间不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters among groups indicate significant differences ($P<0.05$).

著下降($P<0.05$),其中高氮量处理下土壤pH值下降最为显著,较对照组分别下降了0.9、1.2和0.8。红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土的TN含量均随施氮量的增加而显著提升($P<0.05$),其中棕紫泥土的TN含量增加得最多。土壤铵态氮含量随施氮量的增加也有不同程度的提高,在红棕紫泥土中,铵态氮含量在 N_1 、 N_2 、 N_3 处理下分别是对照组的1.15、1.95和2.50倍;灰棕紫泥土中, N_1 、 N_2 和 N_3 处理分别是对照组的1.14、1.31和1.35倍;棕紫泥土的铵态氮含量在 N_1 、 N_2 和 N_3 处理下分别是对照组的1.57、1.83和2.13倍;在低氮量处理下棕紫泥土较对照处理增加的最多;在中氮量和高氮量处理下红棕紫泥土较对照处理增加的较多。硝态氮含量在同一施氮量下不同类型土壤有不同的表现,红棕紫泥土的硝态氮含量在 N_3 处理下显著超过其他处理($P<0.05$),棕紫泥土和灰棕紫泥土中 N_1 处理的硝态氮含量显著高于其他处理($P<0.05$)。有机质含量在不同类型土壤中随着施氮量的变化也有不同的表现,红棕紫泥土有机质含量在 N_3 处理下达到最高,显著高于对照组($P<0.05$);灰棕紫泥土有机质含量依次为 $N_1>N_2>CK>N_3$, N_3 处理显著降低至 $13.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$);棕紫泥土的有机质含量在 N_1 和 N_2 处理下高于CK和 N_3 处理($P<0.05$)。在不同施氮量下,3种紫色土的阳离子交换量(CEC)均随施氮量的增加而显著减少($P<0.05$),在相同施氮量下,红棕紫泥土CEC最高,其次是灰棕紫泥土,棕紫泥土最低。具体而言,相较于对照组, N_1 、 N_2 、 N_3 处理使红棕紫泥土CEC分别降低10.26%、23.73%、37.13%;灰棕紫泥土分别降低12.47%、23.89%、50.77%;棕紫泥土分别降低11.00%、13.32%、22.41%。

2.2 铵态氮肥施用量对不同类型紫色土 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量的影响

在红棕紫泥土中(图1a),第1淋溶阶段的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度总体呈下降趋势。第2淋溶阶段, N_3 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从 II_2 的 $36.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 明显降低至 II_3 的 $11.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,并持续下降至 II_6 阶段。对于灰棕紫泥土(图1b), N_3 处理第1淋溶阶段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 I_2 到 I_3 略有上升,然后下降至 I_6 阶段的 $13.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 N_1 和 N_2 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在初期有所下降, N_3 处理在 $\text{I}_4\sim\text{I}_5$ 阶段稳定后也有所下降。在第2淋溶阶段, N_1 、 N_2 、 N_3 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别从 II_2 的 19.97 、 30.25 和 $36.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐步降至 II_6 阶段的 5.54 、 6.11 和 $10.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。棕紫泥土(图1c)呈类似的情

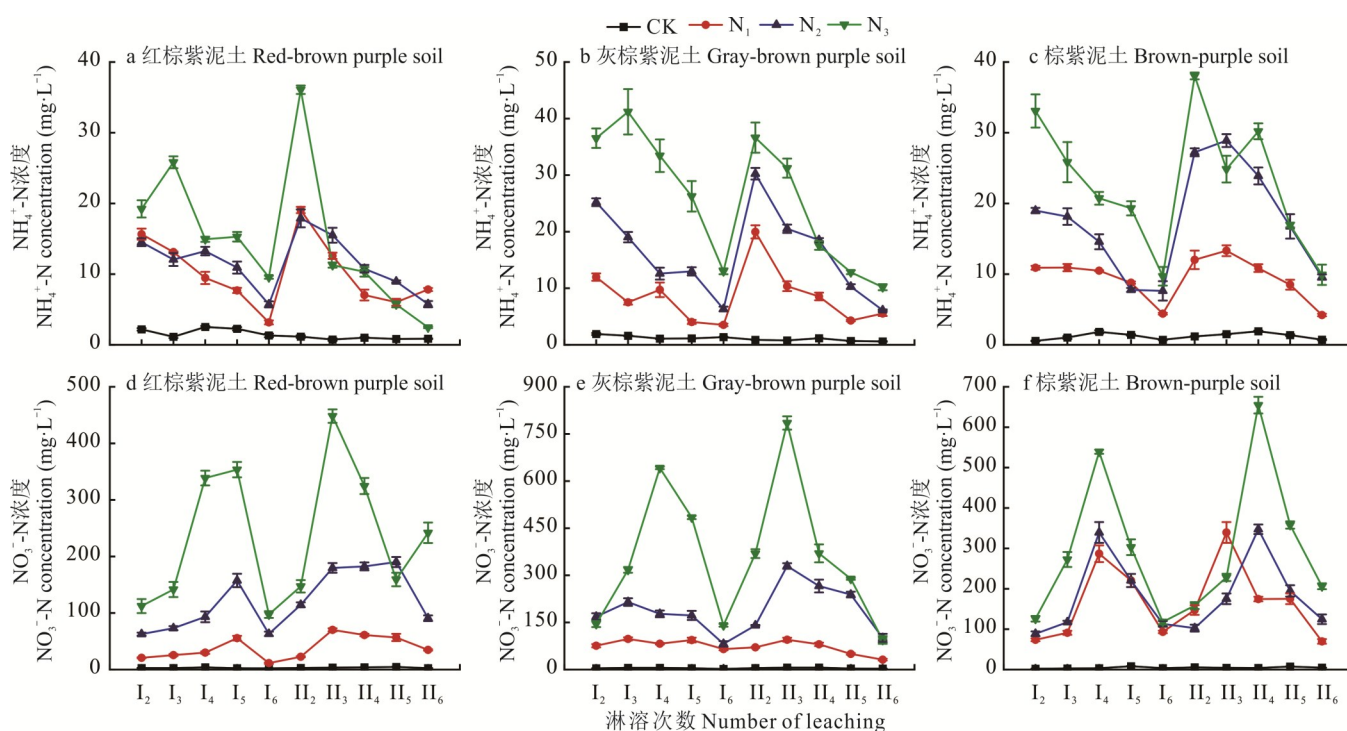


图1 铵态氮肥施用量对不同类型紫色土淋溶中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的影响

Fig. 1 Effect of ammonium nitrogen fertilizer application on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration in the leachate of different types of purple soil

况,在第1淋溶阶段所有处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均逐渐下降。在第2淋溶阶段, N_1 和 N_2 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 II_2 到 II_3 略有上升,然后逐渐下降,而 N_3 处理在 II_2 到 II_3 出现明显下降,之后虽略微上升但整体继续呈下降趋势。

红棕紫泥土(图1d)在两个淋溶周期中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均呈先上升后下降的趋势,形成倒“V”型曲线。在第1周期中,所有处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在 I_5 达到峰值后出现下降。在第2周期中, N_3 处理在 II_3 阶段达到峰值后急剧下降,而 N_1 和 N_2 则在 II_3 达到峰值后逐步下降。灰棕紫泥土(图1e)的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度整体趋势与红棕紫泥土相似,第1周期中 N_1 和 N_2 在 I_3 达到峰值后下降,而 N_3 处理在 I_4 达到极高峰值后大幅下降。在第2周期中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均在 II_3 达到峰值。棕紫泥土(图1f)的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在两个周期中也是先升后降。在第1周期中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均在 I_4 达到最高值后下降;在第2周期中, N_2 和 N_3 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在 II_4 达到最高峰值后逐步下降。

图2a为不同铵态氮肥施用量下3种紫色土两个淋溶阶段的铵态氮累积淋失量。随着施氮量的增加,铵态氮的淋失量显著增加。在 N_3 处理下,红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土的铵态氮淋失量分别较CK处理提升了7.1、15.4和12.5倍($P<0.05$),其中灰棕紫泥土铵态氮累积淋失量显著大于另外两种类型紫色土。如图2b所示,在不同氮肥施用量下,3种紫色土在两个淋溶阶段的确态氮累积淋失量随施氮量的增加,CK处理的确态氮几乎没有淋失,而 N_3 处理分别较 N_1 处理提升了6.1、4.9和1.8倍($P<0.05$)。在所有氮肥处理下,灰棕紫泥土的确态氮累积淋失量显著高于红棕紫泥土($P<0.05$)。

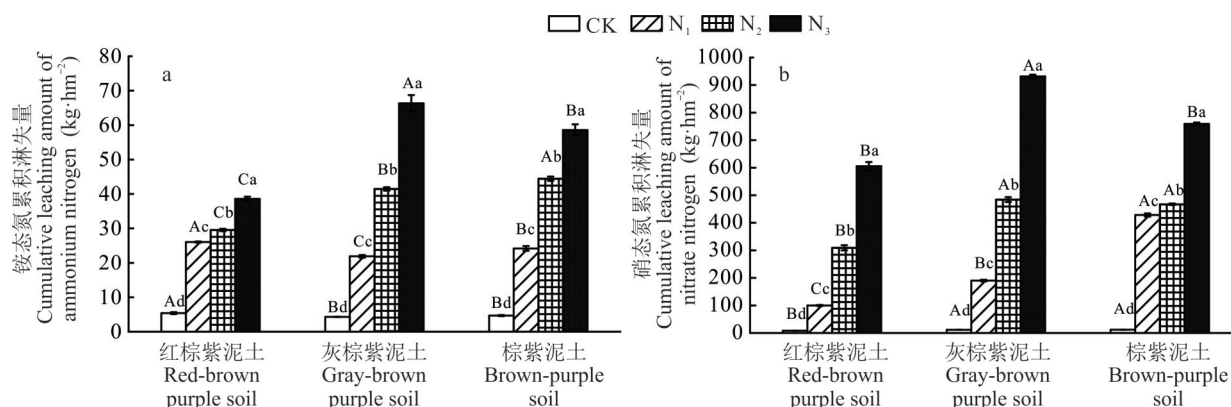


图2 铵态氮肥施用量对不同类型紫色土铵态氮和硝态氮累积淋失量的影响

Fig. 2 Effect of applying ammonium sulfate on the total leaching amount of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in different types of purple soil

不同小写字母表示不同氮肥处理下差异显著,不同大写字母表示不同土壤类型间差异显著。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different nitrogen fertilizer treatments ($P<0.05$); Different uppercase letters indicate significant differences among different soil types ($P<0.05$). The same below.

2.3 铵态氮肥施用量对不同类型紫色土表面电化学性质的影响

不同铵态氮肥施用量对不同类型紫色土表面电位(φ_0)、表面电荷密度(σ_0)、表面电场强度(E_0)、比表面积(S)和表面电荷数量(SCN)的影响见图3。总体而言,土壤表面电荷化学特征在不同施氮量处理下,以及不同类型紫色土之间均呈现出明显差异,具体结果如下:

如图3a所示,与未施肥的对照组(CK)相比,红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土在 N_1 、 N_2 和 N_3 处理下的 φ_0 值均显著提高($P<0.05$)。特别是在棕紫泥土中,与CK相比, N_1 、 N_2 和 N_3 处理分别使 φ_0 值增加了6.28%、31.28%和55.28%($P<0.05$)。在CK、 N_1 和 N_2 处理下,3种土壤的 φ_0 值趋势为:红棕紫泥土<棕紫泥土<灰棕紫泥土;而在 N_3 处理下,这一趋势变为:红棕紫泥土<灰棕紫泥土<棕紫泥土,且棕紫泥土的 φ_0 值显著高于另外两种土壤类型($P<0.05$)。

由图3b可知,在红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土中,土壤 σ_0 值随着施氮量的增加均显著提高($P<0.05$)。与CK相比,红棕紫泥土在 N_1 、 N_2 和 N_3 处理下 σ_0 分别增加了16.67%、20.83%和41.67%;灰棕紫泥土分别增加了

33.33%、77.78%和122.22%；棕紫泥土分别增加了8.33%、18.18%和35.29% ($P < 0.05$)。在 N_1 、 N_2 和 N_3 处理下， σ_0 值的顺序为：灰棕紫泥土 > 棕紫泥土 > 红棕紫泥土；特别是在 N_2 和 N_3 处理下，灰棕紫泥土的 σ_0 值显著超过了其他两种土壤类型 ($P < 0.05$)。在对照组中，棕紫泥土的 σ_0 值最高，显著高于灰棕紫泥土和红棕紫泥土 ($P < 0.05$)。

图3c中，随着施氮量的增加，红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土的 E_0 值均显著增加 ($P < 0.05$)。在这些土壤中，灰棕紫泥土的 E_0 值最高，其次是棕紫泥土，红棕紫泥土的 E_0 值最低。特别是灰棕紫泥土和棕紫泥土的 E_0 值显著高于红棕紫泥土 ($P < 0.05$)。

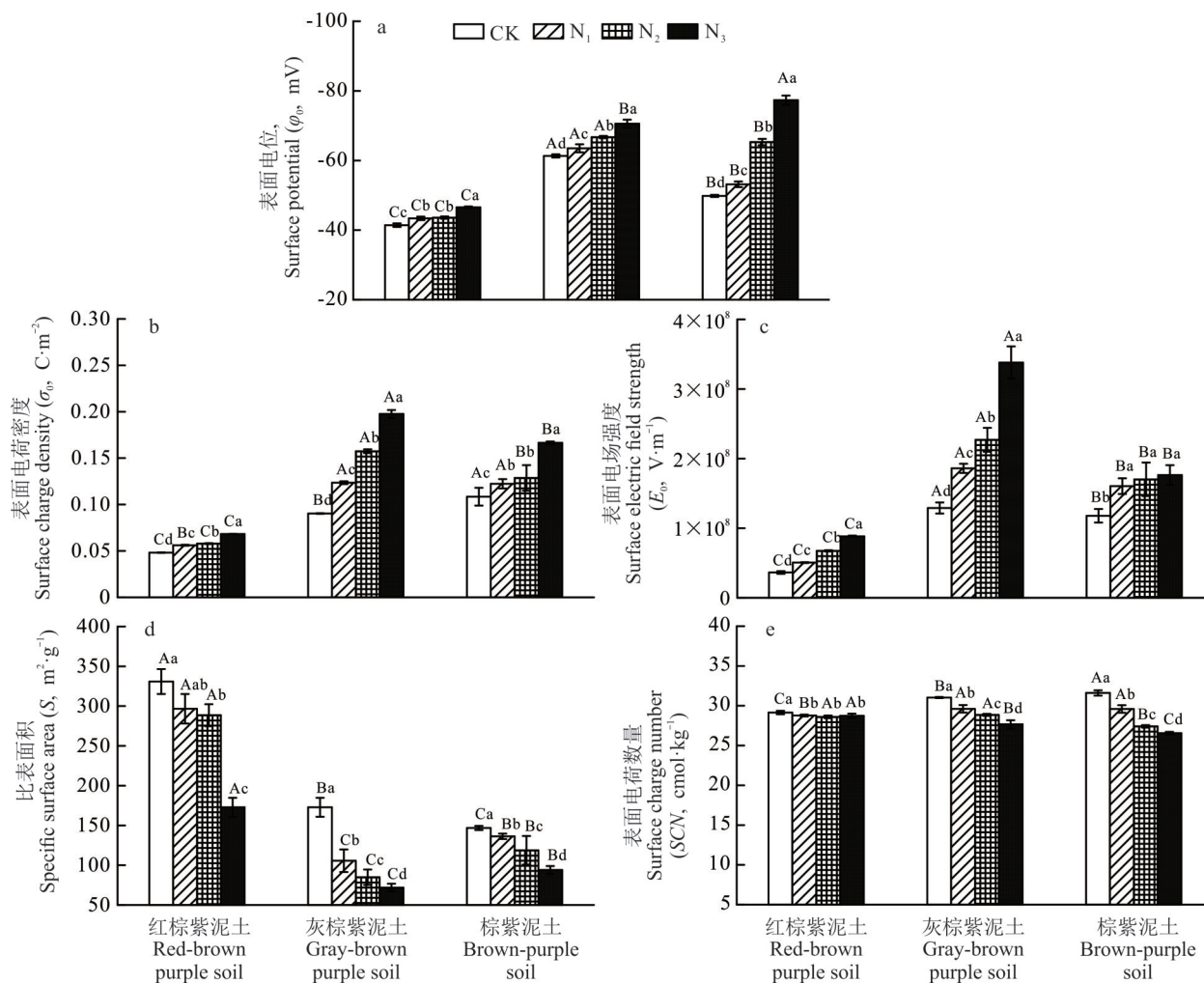


图3 铵态氮肥施用量对不同紫色土表面电化学性质的影响

Fig. 3 Effect of ammonium nitrogen fertilizer application on the surface electrochemical properties of different types of purple soils

如图3d所示，在红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土中，比表面积随着施氮量的增加而显著下降 ($P < 0.05$)，尤其是在 N_3 处理下，下降最为显著。相比于对照组 (CK)， N_3 处理下比表面积分别减少了47.78%、58.40%和35.87%。在 N_1 、 N_2 和 N_3 处理下，3种类型土壤的比表面积存在显著差异，表现为：红棕紫泥土 > 棕紫泥土 > 灰棕紫泥土 ($P < 0.05$)。

由图3e可知，红棕紫泥土在不同水平的氮肥处理下，相比CK，SCN值显著降低 ($P < 0.05$)。在灰棕紫泥土和棕紫泥土中，随着氮肥处理水平的提高，SCN值呈逐渐下降的趋势，表现为CK > N_1 > N_2 > N_3 。对照组中，棕紫泥土的SCN值显著高于红棕紫泥土和灰棕紫泥土 ($P < 0.05$)，而灰棕紫泥土的SCN值显著高于红棕紫泥土 ($P < 0.05$)。在 N_1 处理下，SCN值为灰棕紫泥土最高，其次是棕紫泥土，红棕紫泥土最低。而在 N_2 处理下，灰棕紫泥

土的SCN值高于红棕紫泥土,两者均显著高于棕紫泥土($P<0.05$)。在 N_3 处理下,红棕紫泥土的SCN值显著高于其他两种土壤类型($P<0.05$)。

2.4 土壤表面电化学性质与 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N淋失量间的关系

从紫色土电化学性质和无机氮淋失的冗余分析结果来看(图4),在铵态氮肥的施用下土壤表面电化学性质影响着土壤的无机氮淋失。冗余分析结果表明,前两轴累计解释土壤无机氮淋失变异的84.46%,其中 ϕ_0 、 E_0 和 σ_0 与无机氮淋失之间有显著的正相关关系(R^2 分别为0.397、0.477和0.521, $P=0.001$),而S和SCN与无机氮淋溶之间有显著的负相关关系($R^2=0.295$, $P=0.004$; $R^2=0.624$, $P=0.001$)。

3 讨论

3.1 铵态氮肥施用量对紫色土pH和养分含量的影响

本研究结果表明,施用不同梯度的铵态氮肥显著提高了3种类型紫色土的全氮和铵态氮含量。这是因为化肥的直接施用为土壤提供了养分,迅速提高了土壤的铵态氮和全氮含量。CK处理的铵态氮含量较原始土样同样有明显增加,一方面,作物在生长过程中会产生根系和残留物,这会导致土壤有机质含量增加,这些有机质在分解过程中会释放出铵态氮^[21]。另一方面这可能与所在地区氮沉降相关,重庆地区的氮沉降量较高,尤其是铵态氮占总沉降量的比例较大^[22]。并且土壤中的氮素循环是一个动态平衡过程,速效养分的快速变化和转化会导致土壤中铵态氮含量的波动和积累^[23]。此外,研究结果还显示,在大量施氮条件下,红棕紫泥土和棕紫泥土的硝态氮含量较中量施氮处理显著升高。其原因可能是:一方面,过量施入铵态氮肥会使土壤酸化,导致土壤水稳性团聚体结构破坏,造成土壤板结和物理性状恶化,从而降低土壤保水保肥能力,土壤孔隙大,使水分和养分易流失^[24]。另一方面,大量铵态氮肥施入土壤后, NH_4^+ 会被土壤吸附,经过硝化作用生成 NO_3^- ,由于 NO_3^- 带负电荷,不易被土壤吸附,经过淋洗后会造成其大量流失^[25-26]。土壤有机质是土壤的重要组成成分,是衡量土壤肥力的重要指标^[27-28]。本研究结果表明,在大量施氮处理(N_3)下,灰棕紫泥土的有机质含量显著低于其他处理,棕紫泥土的有机质含量显著低于 N_1 和 N_2 处理,说明过量施氮会降低灰棕紫泥土和棕紫泥土的有机质含量,这与Su等^[29]的研究结果一致。这可能是因为施用化肥会减少作物根茬残留量,导致原始土壤有机质的损失和消耗^[30]。此外,长期单施化肥会降低土壤pH,破坏土壤团聚体结构,进而降低土壤有机质含量^[31]。铵态氮肥导致的土壤酸化程度强于酰胺态氮肥^[32-34]。李娟等^[35]在对赤红壤旱地的长期定位试验中发现,长期施用氮肥均促进了赤红壤旱地土壤酸化。

3.2 铵态氮肥施用量对紫色土 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N淋失的影响

本研究结果表明,在 N_3 处理下,3种类型紫色土的铵态氮淋失浓度在两次追肥后随着淋溶次数的增加总体呈逐步下降的趋势。其中,红棕紫泥土和灰棕紫泥土的淋溶液铵态氮淋失浓度在 $I_2\sim I_3$ 阶段有小幅上升,这主要是因为这两种土壤的黏粒含量较高,对水分有一定的留滞作用,导致在淋溶初期外源施入的铵态氮肥大部分以 NH_4^+ -N的形式残留在土壤中^[36]。此外,本研究结果还显示,3种类型紫色土在两次追肥后的 NO_3^- -N淋失浓度随着淋溶次数的增加总体呈先上升后下降的趋势,且在追肥后的第4或第5次淋溶后达到峰值。赵旭等^[37]对热带亚

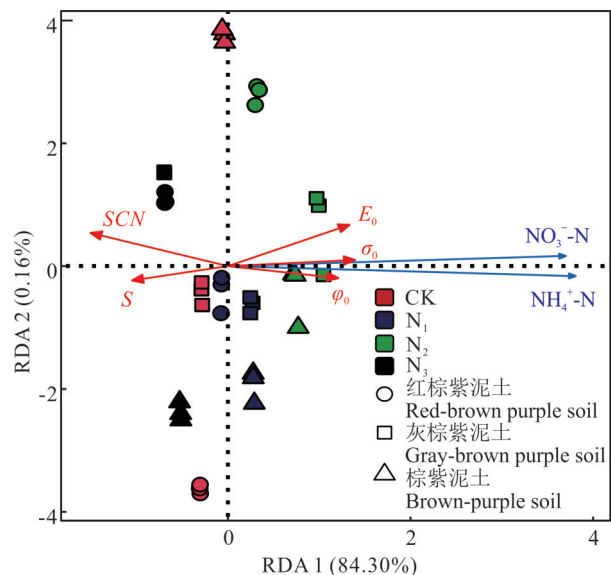


图4 不同铵态氮肥施用量下紫色土电化学性质对无机氮淋溶的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of inorganic nitrogen leaching by electrochemical properties of purple soil under different ammonium sulfate dosage

蓝色箭头分别表示硝态氮和铵态氮累积淋失量,红色箭头分别代表土壤电化学性质,RDA1和RDA2分别表示第1和第2排序轴。The blue arrows represent the cumulative leaching losses of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen, while the red arrows represent the soil electrochemical properties. RDA1 and RDA2 represent the first and second ordination axes, respectively.

热带酸性土壤硝化作用与氮淋溶特征的研究中指出,在对4种不同热带亚热带酸性土壤施加外源 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 后,淋溶液的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均呈先增加后降低的趋势,但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度出现峰值时间和大小各不相同,本研究结果与其一致。这一现象主要归因于本研究中3种类型紫色土的土壤质地不同。铵态氮肥施入土壤后,发生硝化作用,而铵态氮向硝态氮转化需要一定的时间,且硝化作用依赖于氧气,3种类型紫色土的物理结构差异导致其土壤透气性不同,从而影响土壤中的微生物活性^[38]。

陈子聪等^[39]针对施用不同氮肥量对黄泥土硝态氮淋失的影响进行了研究,结果表明:在高量氮肥施用条件下,硝态氮淋失浓度最高可达 $192.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。然而,本研究中在高量施用铵态氮肥的条件下,3种类型紫色土的硝态氮淋失浓度峰值均超过 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。产生这一现象的原因是,本研究采用的3种紫色土初始pH为碱性或中性,而上述研究中的黄泥土为酸性土,酸性土中的硝化作用相对较弱。碱性土在施氮肥后,其硝化作用更为剧烈,从而产生更多的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[40-41]。在3种紫色土中,红棕紫泥土的硝态氮淋失量最低。这一方面与其土壤质地有关,红棕紫泥土是由红棕紫色泥岩发育而成的石灰性紫色土,属于粉砂质黏壤土,水分透过率较低,能够有效防止水分径流。与其他两种土壤相比,粉砂质黏壤土具有更高的田间持水量,能够更有效地吸附水分,并具有较好的通气性和水分蒸发能力,因此其硝态氮的淋失总量较小。这与兰翔等^[42]的研究结果相似。另一方面,红棕紫泥土的有机质含量高于其他两种紫色土,有机质有助于形成土壤大团聚体,有利于土壤养分的保持,减少 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失^[43-45]。硝态氮和铵态氮淋失会导致土壤中可供植物吸收的氮素减少,从而降低土壤的供氮能力^[46],同时氮是植物生长的关键营养元素,氮淋失会直接影响植物的生长和产量^[47]。此外,氮淋失还会影响土壤氮循环的其他部分,土壤中铵态氮和硝态氮含量的减少,会影响微生物活动和氮转化相关过程,这些变化都可能进一步减少氮的有效性和植物的氮利用率^[48]。

3.3 铵态氮肥施用量对紫色土表面电化学性质的影响

在本试验中,观察到在各施氮水平下,红棕紫泥土、灰棕紫泥土和棕紫泥土的表面电荷密度和电场强度随施氮量的增加而增加。这主要是因为外源 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的施入会增加土壤中的电解质浓度。丁武泉等^[13]在对中性紫色土和砖红壤表面电荷性质的比较研究中也发现,土壤的电荷密度随电解质浓度的增加而增加,本研究结果与其一致。土壤表面电荷数是作物吸收营养元素的关键因素,它决定了土壤吸附离子的数量^[10]。然而,本试验结果显示,在多次施肥和淋溶后,3种类型紫色土的土壤表面电荷数量随着施氮量的增加而呈下降趋势。这表明过量的氮肥并不能有效增加土壤表面电荷数,带负电荷的土壤胶体颗粒能够吸附带正电的铵根离子,从而减少氮素的流失,提高土壤的供氮能力,当土壤表面电荷数量不再增加时就会造成增氮不增收的现象^[49-50]。土壤胶体具有巨大的比表面积,是土壤进行吸附反应和离子交换的重要场所,它与土壤保持和供应作物所必需的养分和水分能力密切相关。土壤胶体的比表面积越大,其表面带有的电荷越多,当分散在土壤溶液中时,界面上会产生更多的双电层,不仅能提高土壤的吸附力和离子交换能力,还能储存氮素,这有助于提高土壤的吸附力和离子交换能力,从而为作物的生长提供养分保障。在本研究中,氮肥经淋溶作用可以通过改变土壤颗粒之间的排斥力来影响土壤的比表面积^[51],3种紫色土在施入氮肥后土壤比表面积均随施氮量的增加而呈下降趋势。这可能是由于施入氮肥之后导致有机质(有机质胶体)减少,进而降低了土壤比表面积和土壤表面电荷数量,这与马任甜等^[52]的研究结果一致。此外,土壤表面电化学性质随土壤质地变化很大。在本研究中,红棕紫泥土的比表面积明显大于其余两种类型紫色土,而灰棕紫泥土和棕紫泥土的表面电位、表面电荷密度和表面电场强度却显著高于红棕紫泥土。由于土壤质地决定了土壤颗粒的大小和分布,进而影响土壤的比表面积,红棕紫泥土的黏粒含量较高,土壤颗粒细小,所以比表面积较大,这与赵楚等^[10]的研究结果一致。一般黏粒较多的土壤具有较高的表面活性,它们对带正电的离子具有很强的吸附能力,但土壤表面电化学性质也受土壤pH值的影响,土壤溶液中氢离子的浓度控制着不同带电位点的数量,影响着可变带电位点的质子化和去质子化反应、可交换阳离子的化合价以及周围土壤溶液中的离子强度^[53],这与Liu等^[54]的研究结果相似。

4 结论

3种紫色土表面电位、表面电场强度和表面电荷密度均随着铵态氮肥施用量的增加而显著增加,比表面积和

表面电荷数量则随着铵态氮肥施用量的增加而降低。过量施用铵态氮肥会导致紫色土中 NO_3^- -N大量淋失,且这种淋失受土壤质地和表面电化学性质的影响。因此,过量施用铵态氮肥不仅不能提高紫色土的养分含量,反而导致土壤酸化,改变土壤的表面电化学性质,降低土壤对养分的吸附和保持能力,从而降低土壤肥力。

参考文献 References:

- [1] Qiao C L, Buren B Y. Effects of application of synthetic nitrogen fertilizers on soil nutrient supply and loss of reactive nitrogen in tea (*Camellia sinensis* L. Kuntze) gardens in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 174—181.
乔春连, 布仁巴音. 合成氮肥对中国茶园土壤养分供应和活性氮流失的影响. *土壤学报*, 2018, 55(1): 174—181.
- [2] Chen Y Z, Wang F, You Z M, *et al.* Effects of different nitrogen application levels on nitrogen leaching in tea garden soil. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 30(4): 394—399.
陈玉真, 王峰, 尤志明, 等. 不同施氮量对茶园土壤氮淋失的影响. *福建农业学报*, 2015, 30(4): 394—399.
- [3] Dai J, Wang C H, Li Q, *et al.* Effect of nitrogen application rate on winter wheat and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on drylands. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 956—965.
戴健, 王朝辉, 李强, 等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响. *土壤学报*, 2013, 50(5): 956—965.
- [4] Yan N, Wang J H, Cheng E B, *et al.* Effect of long-term fertilization on surface charge properties of soil clay complex. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2017, 39(6): 703—708.
闫娜, 王继红, 程恩宝, 等. 长期施肥对土壤黏粒级复合体表面电荷性质的影响. *吉林农业大学学报*, 2017, 39(6): 703—708.
- [5] Tian Q H, Liu D, Liao X Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on soil aggregate biological binding agents and stability in an alpine grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(11): 46—57.
田晴华, 刘丹, 廖小琴, 等. 施氮对高寒草地土壤团聚体生物胶结物质及稳定性的影响. *草业学报*, 2024, 33(11): 46—57.
- [6] Wang P, Xu D, Lakshmanan P, *et al.* Mitigation strategies for soil acidification based on optimal nitrogen management. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2024, 11(2): 229—242.
- [7] Yu L, Gao M, Huang L L, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on leaching characteristics of NO_3^- -N and base cations in latosol. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(3): 698—704.
余砾, 高明, 黄利玲, 等. 施用氮肥对砖红壤硝态氮和盐基离子淋失特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 698—704.
- [8] 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 & Biochemistry*, 2011, 43(11): 2215—2221.
- [9] Yu Z H, Liu X M, Li H. On surface charge properties of red, yellow and calcareous purplish soils. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 38(3): 62—66.
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. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 38(3): 62—66.
- [10] Zhao C, Sheng M Y, Li Y X, *et al.* Characteristics of soil electrochemical properties and soil environmental impact factors in Karst ecosystem in South West China. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 756—766.
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. *土壤学报*, 2022, 59(3): 756—766.
- [11] 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.
- [12] Zhang W. Effects of soil particle surface electric field on nitrification in acidic soil. Chongqing: Southwest University, 2010.
张伟. 土壤颗粒表面电场对酸性土壤硝化作用的影响. 重庆: 西南大学, 2010.
- [13] Ding W Q, Li H, Song Z R, *et al.* Surface charge properties of neutral purplish soil and latosol. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(6): 1086—1091.
丁武泉, 李航, 宋仲容, 等. 中性紫色土和砖红壤表面电荷性质的比较研究. *土壤通报*, 2007, 38(6): 1086—1091.
- [14] Walsch J, Dultz S. Effects of pH, Ca^{2+} and SO_4^{2-} concentration on surface charge and colloidal stability of goethite and hematite—consequences for the adsorption of anionic organic substances. *Clay Minerals*, 2010, 45(1): 1—13.
- [15] Zhu M X, Jiang X, Ji G L. Kinetics of interaction of H^+ with constant and variable charge soils. *Environmental Science*,

- 2001, 22(3): 49—53.
- 朱茂旭, 蒋新, 季国亮. 可变电荷土壤和恒电荷土壤与氢离子的反应动力学. 环境科学, 2001, 22(3): 49—53.
- [16] Li C P, Li X, Wang X, *et al.* Effects of acidification environment on exchangeable cations and acid buffering capacity of weathering products of purple parent rock. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 258—271.
- 李春培, 李雪, 汪璇, 等. 酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响. 土壤学报, 2024, 61(1): 258—271.
- [17] Luo D Q, Wei C F, Xie D T. Physicochemical characterization of purple soil surface//The 10th national congress of China geosynthetics society and the 5th cross-strait soil fertilizer symposium. Shenyang: Soil Science Society of China, 2004: 96.
- 骆东奇, 魏朝富, 谢德体. 紫色土表面物理化学特征研究//中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会. 沈阳: 中国土壤学会, 2004: 96.
- [18] Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring. Beijing: China Land Press, 2008.
- 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [19] Li H, Qing C L, Wei S Q, *et al.* An approach to the method for determination of surface potential on solid/liquid interface: theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 275(1): 172—176.
- [20] Yu L. Effect of nitrogen application on the coupling leaching of nitrate nitrogen and base cations in variably charged soils. Chongqing: Southwest University, 2012.
- 余冻. 施氮对可变电荷土壤中硝酸根离子和盐基离子耦合迁移的影响. 重庆: 西南大学, 2012.
- [21] Song Z Z, Li X H, Li J, *et al.* Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 525—533.
- 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 525—533.
- [22] He R L, Jiang Y J, Zhang Y Z, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric inorganic nitrogen and sulfur deposition in the suburbs of Chongqing. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 6173—6185.
- 何瑞亮, 蒋勇军, 张远瞩, 等. 重庆市近郊大气无机氮、硫沉降特征及其来源分析. 生态学报, 2019, 39(16): 6173—6185.
- [23] De Vries W, Liu X, Yuan L. Highlights of the special issue “Progress on nitrogen research from soil to plant and to the environment”. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9(3): 313—315.
- [24] Wahyudi I, Handayanto E. The potential of legume tree prunings as organic matters for improving phosphorus availability in an acid soil. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 2015, 2(2): 259—266.
- [25] Song H X, Li S X. Effects of root uptake function and soil water on NO_3^- -N and NH_4^+ -N distribution. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1): 96—101.
- 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响. 中国农业科学, 2005, 38(1): 96—101.
- [26] Chuan L M, Zhao T K, An Z Z, *et al.* Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11): 200—205.
- 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200—205.
- [27] Sinatra M, Giannetta B, Plaza C, *et al.* Anaerobic digestate influences the carbon distribution in soil organic matter pools after six months from its application. *Soil & Tillage Research*, 2024, 239(1): 106049.
- [28] Li Y, Xu M, Xie Y H, *et al.* Effects of different modifiers on aggregates and organic carbon in acidic purple soil. *Environmental Science*, 2024, 45(2): 974—982.
- 李越, 徐曼, 谢永红, 等. 不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响. 环境科学, 2024, 45(2): 974—982.
- [29] Su Y Z, Wang F, Suo D R, *et al.* Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 75(1/2/3): 285—295.
- [30] Li X A, Tong C L, Jiang P, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic matter and total nitrogen in paddy soil. *Soils*, 2006(3): 298—303.
- 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响. 土壤, 2006(3): 298—303.
- [31] Nie J, Zheng S X, Yang Z P, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizers, pig manure and rice straw on physical properties of a reddish paddy soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(7): 1404—1413.
- 聂军, 郑圣先, 杨曾平, 等. 长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响. 中国农业科学, 2010, 43(7): 1404—1413.

- [32] Bouman O T, Curtin D, Campbell C A, *et al.* Soil acidification from long-term use of anhydrous ammonia and urea. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(5): 1488–1494.
- [33] Zhou J, Xia F, Liu X, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on the acidification of two typical acid soils in South China. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(2): 415–422.
- [34] Li T, Yu L, Wan G H, *et al.* Spatio-temporal variation of farmland soil pH and associated affecting factors in the past 30 years of Shandong Province, China. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 180–190.
李涛, 于蕾, 万广华, 等. 近30年山东省耕地土壤pH时空变化特征及影响因素. *土壤学报*, 2021, 58(1): 180–190.
- [35] Li J, Zhang L C, Zhang M Q, *et al.* Characterization and prediction of topsoil acidification of latosolic red soil caused by long-term urea application. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(12): 2161–2171.
李娟, 张立成, 章明清, 等. 长期施用尿素降低赤红壤旱地耕层pH的特征与预测. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(12): 2161–2171.
- [36] Luo F X, Liu H T, Lin C W, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer forms on soil nitrogen loss dynamics of sloping land in rainy season. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(3): 12–20.
罗付香, 刘海涛, 林超文, 等. 不同形态氮肥在坡耕地雨季土壤氮素流失动态特征. *中国土壤与肥料*, 2015(3): 12–20.
- [37] Zhao X, Cai S Y, Xing G X, *et al.* Nitrification and nitrogen leaching in tropical and subtropical acid soils. *Soils*, 2020, 52(1): 1–9.
赵旭, 蔡思源, 邢光熹, 等. 热带亚热带酸性土壤硝化作用与氮淋溶特征. *土壤*, 2020, 52(1): 1–9.
- [38] Liu L. Acidity characteristics and acid buffering performance of typical purple soils in the Sichuan Basin. Chongqing: Southwest University, 2022.
刘莉. 四川盆地典型紫色土的酸度特征和酸缓冲性能. 重庆: 西南大学, 2022.
- [39] Chen Z C, Zhang M Q, Chen F, *et al.* Effect of N fertilizer on nitrate-nitrogen loss from garden soils. *Ecology and Environment*, 2008(3): 1230–1234.
陈子聪, 章明清, 陈防, 等. 氮肥对菜园土壤硝态氮淋溶流失的影响. *生态环境*, 2008(3): 1230–1234.
- [40] Cheng Y, Zhang J B, Cai Z C. Key role of matching of crop-specific N preference, soil N transformation and climate conditions in soil N nutrient management. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 507–515.
程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候—土壤—作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用. *土壤学报*, 2019, 56(3): 507–515.
- [41] Meng Y, Wang Z H, Luo H Y, *et al.* Mechanisms research on how pH affects nitrification in purple soils of Southwest China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(4): 73–79.
孟瑶, 王智慧, 罗红燕, 等. 西南地区pH影响紫色土硝化作用机制研究. *草业学报*, 2017, 26(4): 73–79.
- [42] Lan X, Wang T, Yang C L, *et al.* Effects of different phosphorus application rates on nitrate nitrogen leaching in vegetable fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4): 958–964.
兰翔, 王婷, 杨春玲, 等. 不同施磷量对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 958–964.
- [43] Van Den Bergh S G, Chardon I, Leite M F A, *et al.* Soil aggregate stability governs field greenhouse gas fluxes in agricultural soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2024, 191(1): 109354.
- [44] Wang W Y, Shen P F, Zhang H P, *et al.* Study on the relationship between total nitrogen and nitrogen functional microorganisms in soil aggregates under long-term conservation tillage. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(6): 1653–1667.
王威雁, 沈鹏飞, 张侯平, 等. 长期保护性耕作下土壤团聚体全氮与氮功能微生物关系研究. *土壤学报*, 2024, 61(6): 1653–1667.
- [45] Guo W Z, Hu F N, Tan T T, *et al.* Effects of soil surface electric field on aggregates breakdown and water erosion in black soil region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2644–2652.
郭威震, 胡斐南, 谭滔滔, 等. 土壤表面电场对黑土团聚体破碎和侵蚀的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2644–2652.
- [46] Xie H B, Guan S Y, Chen Y M, *et al.* Characteristics of soil nitrogen leaching in facility vegetable fields and the control measures: A review. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(23): 82–87.
谢洪宝, 关诗洋, 陈一民, 等. 设施菜田土壤氮素淋溶特征及阻控措施的研究进展. *中国农学通报*, 2022, 38(23): 82–87.
- [47] Jiang Z X, Cui S, Zhang X, *et al.* Influence of biochar application on soil nitrate leaching and phosphate retention: A synthetic Meta-analysis. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4658–4668.
姜志翔, 崔爽, 张鑫, 等. 基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响. *环境科学*, 2022, 43(10): 4658–4668.
- [48] Liu X, Tan N, Zhou G, *et al.* Plant diversity and species turnover co-regulate soil nitrogen and phosphorus availability in

- Dinghushan forests, southern China. *Plant and Soil*, 2021, 464(1/2): 257–272.
- [49] Gao L M, Tian Q, Su J, *et al.* Effects of nitrogen application on dry matter yield and nitrogen fertilizer use efficiency in sweet sorghum (*Sorghum bicolor*). *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4): 192–198.
高丽敏, 田倩, 苏晶, 等. 施氮水平对甜高粱干物质产量及氮肥利用率的影响. *草业学报*, 2020, 29(4): 192–198.
- [50] Ma S K, Huo K, Zhang D X, *et al.* Effects of maize straw return combined with nitrogen on soil enzyme activity and nitrogen fertilizer use efficiency in western dryland wheat fields of Henan Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 120–133.
马嵩科, 霍克, 张冬霞, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对豫西旱地小麦土壤酶活性和氮肥利用效率的影响. *草业学报*, 2023, 32(6): 120–133.
- [51] Wang Q, Wen J, Wen Y, *et al.* Alteration of soil-surface electrochemical properties by organic fertilization to reduce dissolved inorganic nitrogen leaching in paddy fields. *Soil & Tillage Research*, 2021, 209(1): 104956.
- [52] Ma R T, Hu F N, Liu J F, *et al.* Evolution of soil surface electrochemical characteristics with vegetation restoration on Loess Plateau in Ziwuling area. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 392–402.
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. *土壤学报*, 2020, 57(2): 392–402.
- [53] Rengasamy P, Olsson K. Sodicity and soil structure. *Soil Research*, 1991, 29(6): 935–952.
- [54] Liu J Y, Yang Y A, Zheng Q W, *et al.* Effects of soil surface electrochemical properties on soil detachment regulated by soil types and plants. *Science of the Total Environment*, 2022, 834(1): 154991.