

DOI: 10.11766/trxb202502220079

CSTR: 32215.14.trxb202502220079

张琳, 梁蓝月, 李忠意, 赵敬坤, 周佳, 蒋宗益. 水质测量笔速测电导率表征紫色土的肥力水平[J]. 土壤学报, 2026, 63 (1): 221–229.
ZHANG Lin, LIANG Lanyue, LI Zhongyi, ZHAO Jingkun, ZHOU Jia, JIANG Zongyi. Characterizing the Fertility Level of Purple Soil by Electrical Conductivity Measured with a Water Quality Meter[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (1): 221–229.

水质测量笔速测电导率表征紫色土的肥力水平^{*}

张 琳¹, 梁蓝月¹, 李忠意^{1†}, 赵敬坤², 周 佳², 蒋宗益¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121)

摘要: 明确采用廉价水质测量笔速测电导率表征紫色土肥力水平的可行性, 有助于降低分析测试成本, 快速了解土壤肥力特征并及时指导农业生产。本研究在重庆地区采集了78个紫色土耕层土样, 分别采用水质测量笔和电导率仪测定了1:2.5土液比条件下各土样的当量总溶解固体(Equivalent total dissolved solids, ETDS)和标准电导率, 同时对土样的pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、水溶性钙、水溶性镁共7个主要肥力指标进行测定并开展了肥力综合等级评价。结果表明, 水质测量笔具有较好的稳定性和准确性, 所获得的ETDS与土壤碱解氮、有效磷、速效钾、水溶性钙、水溶性镁等肥力指标间均具有极显著的正相关性, 可在一定程度上反映土壤养分含量水平。ETDS与土壤肥力综合指数值之间相关性密切, 可直接根据ETDS值表征土壤肥力等级的高低。当ETDS(土水比1:2.5) $\geq 250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时土壤样品的肥力等级为高, $200 \sim 250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时土壤肥力等级为较高, $100 \sim 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时土壤肥力等级为中等, $50 \sim 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时土壤肥力等级为较低, $<50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时则土壤肥力等级为低。但当ETDS $\geq 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 需注意是否存在因过量施肥或其他因素引起的土壤盐分含量偏高的问题。因此, 可以基于水质测量笔快速测量得到的ETDS值来表征紫色土的肥力水平, 旨在为紫色土肥力水平的快速判定提供新的技术手段。

关键词: 土壤肥力; 紫色土; 电导率; 水质测量笔; 肥力综合指数

中图分类号: S151.9⁺⁵ **文献标志码:** A

Characterizing the Fertility Level of Purple Soil by Electrical Conductivity Measured with a Water Quality Meter

ZHANG Lin¹, LIANG Lanyue¹, LI Zhongyi^{1†}, ZHAO Jingkun², ZHOU Jia², JIANG Zongyi¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing General Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401121, China)

Abstract: A study was conducted to assess the feasibility of using an inexpensive water quality meter for rapid measurement of electrical conductivity(EC) of purple soils and determining fertility levels with EC. A total of 78 purple soil samples from the top layer(0-20 cm) were collected. With a soil-to-water ratio of 1: 2.5, the equivalent ECs, displayed in the form of equivalent total dissolved solids(ETDS), were measured using a water quality meter. The ECs of each soil sample were measured with a laboratory EC meter under the same soil-water ratio. Simultaneously, seven fertility indicators, including pH, organic matter,

* 国家自然科学基金项目(41701256)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41701256)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhongyili@swu.edu.cn

作者简介: 张 琳(1994—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与肥力诊断研究。E-mail: 1760849633@qq.com

收稿日期: 2025-02-22; 收到修改稿日期: 2025-07-29; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-03

available nitrogen, available phosphorus, available potassium, water-soluble calcium, and water-soluble magnesium, were determined. And the comprehensive fertility level of purple soils was evaluated based on these seven fertility indicators. The results revealed that the water quality meter exhibited good stability and accuracy. The ETDS obtained by the water quality meter had extremely significant positive correlations ($P<0.01$) with soil fertility indicators such as available nitrogen, available phosphorus, available potassium, water-soluble calcium, and water-soluble magnesium. It could be inferred that the ETDS reflected the abundance and shortage of the soil nutrients to a certain extent. Besides, there was a close correlation between the ETDS and the comprehensive soil fertility index, allowing for direct characterization of soil fertility levels based on the ETDS value. Consequently, when the ETDS obtained by a water quality meter (soil-to-water ratio of 1: 2.5) $\geq 250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, it means that the fertility level of the purple soils is high; an ETDS value of $200\sim250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ indicates a relatively high fertility level; an ETDS value of $100\sim200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ suggests a medium fertility level; an ETDS value of $50\sim100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ indicates a lower fertility level; while the ETDS value $< 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ indicates a very low fertility level. However, when the ETDS value exceeds $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, caution is advised due to potential excessive soil salt content from overfertilization or other factors. Therefore, the fertility level of purple soil can be characterized based on rapid EC measurements using a water quality meter, providing a new technical means for rapid assessment of soil fertility levels.

Key words: Soil fertility; Purple soil; Electrical conductivity; Water quality meter; Fertility comprehensive index

紫色土是我国土壤发生学分类中的一种特殊土壤，主要是由三叠系至白垩系的紫色沉积岩发育而来的幼年土，广泛分布于我国西南丘陵地区^[1]。受成土母质和发育程度的影响，紫色土矿物质养分和盐基离子含量丰富，是西南地区极为重要的农耕土壤，在粮、油、果、菜等产业中发挥着不可替代的重要作用^[2]。紫色土成土过程以母岩物理风化为主，但由于紫色母岩岩质较为松软，且构造裂缝、成岩裂缝和风化裂缝发育丰富，导致其具有较快的风化速度^[3]。紫色土结构性差，容易发生水土流失，土层较浅，保水保肥能力差，使区域范围内紫色土肥力水平具有不均匀性^[4-5]。20世纪80年代以来，受农事耕作频繁、化肥农药不合理施用等多种因素的影响，紫色土的肥力水平变化明显^[6]。土壤肥力状况是耕地质量和作物生长的主要影响因子。因此，快速和准确地评价紫色土的肥力水平，便于合理开发利用紫色土资源，对促进区域农业可持续发展具有重要意义。

土壤肥力是土壤对植物生长所需养分的供给能力，是土壤各种基本理化性质的综合表现，在评价和利用土壤资源中发挥着重要作用^[7]。土壤pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等理化性质是评价土壤肥力质量的重要指标^[8]。用合理的方法评价土壤肥力有助于政府管理者或农民做出正确的决策，以优化耕地资源并最大限度地提高土壤生产力^[9]。目前，许多研究者运用数理统计方法、地理信息系统

以及地统计学原理进行地力等级的评价，涉及的模型包括模糊综合评价法、灰色关联度法、内梅罗指数法、主成分分析法和聚类分析法等土壤肥力水平综合评估方法^[10-11]。这些方法均需要采集土壤样本并进行复杂的理化性质分析，成本较高。在数据处理时，还会涉及复杂的模型计算和软件使用，对一般的农业生产从业者而言难以上手。此外，不同学者对土壤肥力质量的评价方法各异，可能出现不同甚至完全相反的评价结果，无法精确地指导土壤施肥、改良和管理。因此，亟需更为便捷有效的土壤肥力评价方法或表征手段，以简化土壤肥力的评估过程，提高评估的准确性和实用性。

基于矿质营养学说，植物主要从土壤中以离子态吸收其生长所需的营养元素。因此，在土壤非盐化的情况下，土壤的肥力水平高低与土壤中可溶性矿质元素含量的关系密切^[12]。在一定的土壤环境条件下，土壤的肥力水平越高，土壤中能被植物吸收的离子态养分含量越高，土壤的可溶性盐含量越高，其导电能力越强^[13]。在自然条件下，在西南地区广泛分布的紫色土几乎不存在盐渍化问题。因此，研究是否能够通过测量土壤溶液的电导率来大致反映紫色土的肥力水平是一个值得探讨的问题。土壤的电导率一般采用电导率仪进行测定。目前，市售的水质测量笔其实质就是一款便携式的电导率仪，其市场价格几十元不等，具有价格低廉、使用方便的特点。鉴于此，本研究拟以紫色土为研究对象，探

讨利用廉价水质测量笔速测土壤的电导率来表征紫色土肥力水平的可行性。该方法不仅有助于简化传统土壤肥力评价流程,降低分析测试成本,同时也为农民和农业技术人员提供了更加便捷有效的土壤管理手段,从而促进紫色土区域农业生产的可持续发展,为精准农业和土壤健康管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试土样

在重庆市渝北区、九龙坡区、北碚区、巴南区、万州区、永川区以及忠县共采集了78个紫色土土壤样品。这些紫色土的成土母岩主要为侏罗系沙溪庙组、遂宁组、蓬莱镇组的紫色砂岩和泥岩。所采样品均为耕地土壤样品,部分土壤样品为设施农业土壤样品,采样深度为0~20 cm的耕作层。所有样品采回后在室内自然风干,去除土壤中的根系、砾石等杂物后过1 mm筛备用。

1.2 电导率的测定

采用水质测量笔来快速测定土壤电导率,其原理是基于测量电导率来表征水体可溶性盐含量,从而反映水体质量。该类型电导率仪具有体积小巧、携带方便、操作简单的特点。本研究中所用水质测量笔由北京小米科技有限责任公司生产,重量28 g,长度15 cm,直径约1.6 cm,市场售价约25元。该水质测量笔测定的数据并非标准的电导率,而是经折算后的单位体积水体的当量总溶解固体(Equivalent total dissolved solids, ETDS),所以又被称为TDS水质检测笔。因不同类型盐分的导电能力不同,电导法不可能对可溶性盐含量进行准确定量分析,所以水质测量笔所测定的TDS值只能大致体现出待测水体的可溶性盐含量,本文中称为当量总溶解固体(ETDS)。ETDS的显示单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或ppm,由于ppm并非国际标准浓度单位,因此本文选择的单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

土水比影响土壤电导率的测定结果,土壤水溶性盐的测定一般采用1:5的土水比,但采用加水量小的土水比例,较接近于田间实际情况,可采用1:2.5或1:1的土水比,或采用饱和土浆浸出液^[14]。由于土壤电导率的测定过程为无损检测^[15],本研究中采用与土壤pH测定常用的固液比1:2.5作为测定土壤电导率的土水比,可以在野外条件下按1:2.5的固液比制备待测液,先测电导率,再测pH,

同时快速获得土壤的两个关键参数。在采用水质测量笔进行电导率测定之前,先对水质测量笔的稳定性进行检验。准备一份土壤样品(土水比1:2.5),待测液准备好后每5 min测量1次数据,连续测量1 h,以检验测量数据的稳定性。在确定测量数据的稳定性后,进行样品测量和准确性验证。制备土水比1:2.5的待测悬液,搅拌1 min,静置平衡20 min后再搅拌1 min,然后用水质测量笔测定土壤悬液的ETDS,同时采用实验室的电导率仪(DDS-3,成都方舟)测量土壤悬液的准确电导率。

1.3 土壤肥力指标的测定

为对土壤肥力进行综合评价,采用常规分析方法测定土壤pH、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、水溶性钙、水溶性镁的含量^[16],其中pH采用电位法(土水比1:2.5);土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法;土壤有效磷采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法;土壤速效钾采用 NH_4Ac 浸提—火焰光度法;土壤碱解氮采用碱解扩散法;土壤水溶性钙和土壤水溶性镁含量采用纯水提取—原子吸收分光光度法(Z5000,日本日立)测定。

1.4 肥力综合评价方法

基于上述测定的7个肥力指标,采用模糊综合评价法对各土样的整体肥力水平进行综合评价。首先,基于各项土壤肥力指标对农作物产量和品质的影响程度,计算出相应的隶属度值;随后,利用相关系数法来确定各土壤肥力指标对土壤肥力的贡献度,以此得出权重系数^[17];最后,通过累加法计算得到土壤肥力综合指数,并根据综合指数的大小确定土壤肥力水平的高低。

采用抛物线型函数和S型函数计算各肥力指标的隶属度值。土壤肥力隶属度的数值范围为0.1~1.0,数值越大,该指标对植物生长发育越有利。土壤pH采用抛物线型函数进行隶属度值计算,其余7个肥力指标采用S型函数计算隶属度值。参考已有的研究结果确定各指标隶属度函数曲线转折点的取值^[18]。

抛物线型函数隶属度 N_{ik} 的计算公式为:

$$N_{ik} = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_4 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 1 - \frac{0.9(x-x_3)}{x_4-x_3} & x_3 < x < x_4 \end{cases} \quad (1)$$

土壤 pH 在曲线中的 4 个转折点的取值分别为: $x_1=4.5$, $x_2=6.5$, $x_3=7.5$, $x_4=8.5$ 。S 型函数隶属度 N_{ik} 的计算公式为:

$$N_{ik} = \begin{cases} 1 & x \geq x_2 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (2)$$

S 型隶属度函数中 6 个肥力指标的转折点取值如表 1 所示。通过式 (1) 和式 (2) 可计算得到每

个土壤肥力指标的隶属度值, 以确定每个指标对土壤肥力的贡献程度。

通过 SPSS 25.0 软件计算不同肥力指标之间的相关系数, 对每项肥力指标与其余各项肥力指标的相关系数绝对值进行平均值计算, 所得值被称为肥力指标相关系数平均值, 而每项肥力指标相关系数平均值与所有肥力指标相关系数平均值的总和之比, 则被视为该肥力指标的权重系数^[18]。通过将每项肥力指标的隶属度值与相应的权重系数相乘, 利用累加法, 即可获得每个土壤样品的土壤肥力综合指数。

表 1 S 型隶属度函数曲线转折点的取值

Table 1 Turning points of S-type membership function curve

转折点 Turning point	有机质 Organic matter	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Rapidly available potassium	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen	水溶性钙 Water-soluble calcium	水溶性镁 Water-soluble magnesium
x_1	10	5	50	60	50	5
x_2	30	20	150	120	450	30

2 结果

2.1 水质测量笔的稳定性和准确性的验证

电导率的测定均是基于电解池原理, 外加电源连接两个测量电极后在其两端施加一定量的电压, 根据欧姆定律可计算得到两个电极片间溶液的电阻或电导, 进一步代入两个电极间溶液的体积形状系数后即可计算得到溶液的电阻率或电导率。所以, 电导率的测定装置可以做到非常简洁小巧。为检验水质测量笔的稳定性, 采用水质测量笔每隔 5 min, 连续 1 h 测量了某一紫色土样的 ETDS。在整个 1 h 的测定时间内, 该紫色土悬液的 ETDS 从 $166 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 缓慢上升至 $172 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后趋于稳定, 整体变幅较小。所以, 可以在悬液平衡一定时间后, 放入水质测量笔, 待读数相对稳定后即可读数。

在确定水质测量笔稳定性的前提下, 同时采用电导率仪和水质测量笔测量所采集的 78 个紫色土样品的电导率和 ETDS。结果表明速测方法测定的 ETDS 和实验室标准检测方法测定的电导率之间具有极显著的正相关性 ($r=0.983^{**}$, $P<0.01$) (图 1),

说明两种方法的测定结果具有较好的一致性, 二者的相关方程为 $y=0.7217x-15.493$, 可以基于此方程将水质测量笔测定的 ETDS 值校准为标准电导率值。水质测量笔价格低廉、操作便捷、数据采集较稳定, 可以弥补实验室电导率仪价格昂贵、采样测定周期长、操作繁琐等弊端, 可进一步探究水质测量笔测定土壤肥力的应用潜力。

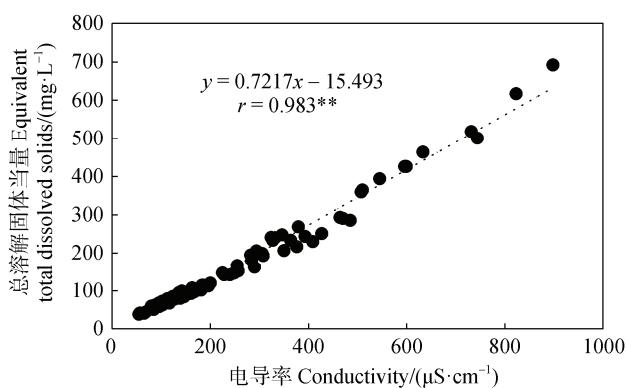


图 1 水质测量笔测定的当量总溶解固体与实验室电导率仪测定的电导率间的相关性

Fig. 1 Correlation analysis of equivalent total dissolved solids (ETDS) measured by water quality meter and electrical conductivity measured by laboratory conductivity meter

2.2 快速测量 ETDS 与各土壤肥力指标的相关性

将速测 ETDS 与 7 个土壤肥力指标进行相关性分析。除土壤有机质, ETDS 与其余各肥力指标之间的相关性均达到显著性水平, 与碱解氮、有效磷、速效钾、水溶性钙、水溶性镁的相关系数分别为 0.586^{**}、0.651^{**}、0.570^{**}、0.936^{**} 和 0.833^{**}($P<0.01$)。土壤电导率主要体现土壤中水溶性阴阳离子的总量, 所以与各水溶态养分离子的相关性更为密切。土壤碱解氮是土壤有效氮的表征指标, 主要体现土壤中易水解有机态氮和铵态氮的含量。土壤有效磷和速效钾主要是土壤中吸附态和水溶态的磷酸根和钾离子含量。土壤易分解有机态氮与无机氮之间受矿化-水解过程的影响, 吸附态和水溶态磷酸根和钾离子受吸附-解吸平衡关系的影响, 均存在动态平衡的关系, 所以基于电导原理测定的 ETDS 在一定程度上也能体现出土壤有效态养分的含量情况。尽管土壤有机物矿化成无机离子的过程关系复杂, 但有机质富含表面官能团, 能吸附大量的无机阴阳离子, 所以测定的 ETDS 和有机质含量间呈正相关性, 但未达显著水平。此外值得注意的是 ETDS 与 pH 呈极显著的负相关性, 这是由于所采集的部分土样为设施农业土壤样品, 我国南方地区的设施农业土地利用强度大, 水肥投入量高, 存在着土壤酸化和次生盐化并存的土壤退化问题。这种因高强度的农业利用所导致的土壤酸化退化问题在紫色土分布区域尤为明显^[19]。图 1 中, 当 ETDS 为 300 mg·L⁻¹ 时的土样均为酸性紫色土。所以在特定的区域条件下, 速测 ETDS 除在一定范围内反映土壤的养分元素含量外, 过高的 ETDS 还可能表征紫色土的酸化和次生盐化趋势。总体而言, 水质测量笔测定的 ETDS 与大多数养分指标之间呈紧密的相关性, 可在一定程度上反映土壤养分含量水平。

2.3 快速测量 ETDS 与土壤肥力水平的相关性

采用肥力综合评价法获得供试紫色土土样的土壤肥力综合指数介于 0.158 至 0.982 之间。土壤肥力综合指数值与水质测量笔测定的土壤 ETDS 间的相关性分析结果如图 2 所示。两者间的相关系数为 0.828^{**} ($P<0.01$), 达到了极显著水平, 证明了供试土样的电导率与土壤肥力水平间的关系密切, 可以采用 ETDS 来表征土壤肥力等级的高低。根据土壤肥力综合指数大小, 将土壤肥力状况分为高肥力(\geq

0.8)、较高肥力(0.6~0.8)、中等肥力(0.4~0.6)、较低肥力(0.2~0.4) 和低肥力(<0.2) 5 个等级^[18]。基于该分级标准并结合图 2 的拟合方程, 可进一步大致划分基于水质测量笔测定结果的土壤肥力等级。本研究中所采用的水质测量笔在未经校准而直接使用的情况下, 当土壤悬液固液比为 1:2.5 时, 测定 ETDS 值 ≥ 250 mg·L⁻¹ 时土壤样品的肥力等级为高、200~250 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为较高、100~200 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为中等、50~100 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为较低、<50 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为低。标准电导率与 ETDS 间的相关方程为 $y=0.7217x-15.493$, 土水比 1:2.5 条件下 50、100、200、250 mg·L⁻¹ ETDS 值对应的标准电导率为 90.7、160、299、368 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 所以也可大致以土壤溶液电导率为 100、150、300、350 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 作为紫色土肥力水平等级划分的边界点。所以可以直接采用水质测量笔速测 ETDS 值来表征土壤肥力等级的高低。

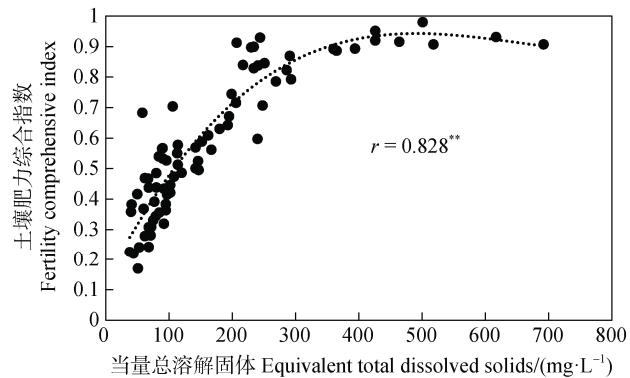


图 2 水质测量笔速测 ETDS 值与土壤肥力综合指数的相关性

Fig. 2 Correlation analysis between equivalent total dissolved solids and fertility comprehensive index

需要注意的是, 正常农事操作管理下的紫色土电导率常在一定的数值范围内, 远远低于盐化与非盐化土壤的临界指标^[20]。图 1 中部分紫色土样品速测的 ETDS 达到 400 mg·L⁻¹ 以上, 尽管这些土样的肥力综合指数较高, 但 ETDS 值较为异常。其原因在于这些土样均为设施农业土样, 过量的水肥投入使土壤中残留的养分和盐分含量较高, 造成测定的 ETDS 和养分含量偏高。此类土壤因过量施肥而化学肥力水平极高, 常伴随着土壤酸化、板结、微生物活性降低等问题。

物群落结构紊乱、连作障碍和土传病害等土壤退化问题，需要进行合理的开发利用。因此，ETDS 可以表征紫色土肥力水平的高低，在一定的数值范围内，ETDS 值越高，土壤肥力水平越高；但当 ETDS 数值太大时，需注意是否存在因过量施肥或其他因素引起的土壤盐分含量偏高的问题。本研究中 ETDS $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 所对应的标准电导率为 $576 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。农业生产实践中可以以 $600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 作为判断紫色土盐分含量是否偏高的临界点。

3 讨 论

3.1 便携式水质测量笔在农业监测中的应用前景

电导法在土壤学领域的主要应用是估算土壤的盐分含量。如林业行业标准《森林土壤水溶性盐分分析标准 (LY/T 1251-1999)》规定了质量法和电导法测定森林土壤的含盐量，该标准中认为电导法较质量法便捷快速得多，可以直接采用电导率评估土壤盐渍化程度，如对新疆南疆土壤盐渍化的划分标准为当土壤电导率(土水比 1:5) 小于 $1.8 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 为非盐渍土， $18 \sim 2.0 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 为可疑，大于 $2.0 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 为盐渍化土。也有研究者将土壤电导率 $4.0 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 作为确定盐土的临界值^[21]。除估算土壤盐分外，早在 1959 年，于天仁等^[22]基于土壤的电化学特性就提出了水稻土的电导率与其肥力的关系，其理论依据在于水稻主要种植在非盐渍性的土壤上，土壤一般不含可溶性盐，所以电导率数值与可溶性矿质养分之间的关系应该比较明显，该研究也证实了土壤溶液中的钾、钙、镁等养分离子是引起土壤导电的主要离子。对于高含水量的非盐渍化土样，因此土壤胶体电荷本身对电导的影响可以忽略不计，所测定的电导率主要由与土壤肥力相关的可溶性阴阳离子的数据和种类所决定^[23]。所以电导法可用于表征非盐渍化土壤的肥力水平。由于土壤电导率的大小受水分含量影响较大，只有在特定土液比条件下的电导率才有表征土壤肥力水平的可行性^[24]。本研究已确定水质测量笔测定的 ETDS 值与实验室电导率仪测定数据间存在极好的相关性，通过标准溶液校正后完全可以获得准确的土壤电导率。这表明水质测量笔作为一种便携式设备，在一定程度上可以替代传统的电导率仪来进行土壤电导率的现场快速监测。考虑到电导率仪在野外使用时存在的不

便，例如需要较复杂的操作流程以及较高的成本，使用水质测量笔不仅简化了操作步骤，降低了设备成本，同时也提高了监测效率，尤其是在广大农村地区，这对于促进农业生产的科学化管理具有重要意义。

3.2 水质测量笔快速表征紫色土肥力的方法措施

紫色土是一种主要分布在我国西南地区的非地带性非盐渍化土壤。敬芸仪^[20]的研究发现四川盆地主要地层发育紫色土，在土水比为 1:5 条件下测定的电导率数值为 $66.3 \sim 334 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，远远低于盐化与非盐化土壤的临界指标，土壤电导率可以用来作为衡量紫色土肥力的参考指标。本研究已证明基于水质测量笔测定的 ETDS 快速表征紫色土的肥力水平是准确可行的。土壤电导率作为一项快速检测技术，能够在一定程度上反映紫色土中养分的总体状况，从而为农业管理和决策提供重要的参考依据^[25]。在 1:2.5 的土水比条件下，ETDS 值 ≥ 250 、 $200 \sim 250$ 、 $100 \sim 200$ 、 $50 \sim 100$ 和 $< 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，或电导率值 ≥ 350 、 $300 \sim 350$ 、 $150 \sim 300$ 、 $100 \sim 150$ 和 $< 100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时，分别对应的紫色土肥力水平为高、较高、中等、较低和低。但当 ETDS $\geq 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或电导率 $\geq 600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时，对于紫色土而言可能存在盐分含量过高的问题 (表 2)。目前大多数市售水质测量笔只能测定 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为单位的 ETDS，少量水质测量笔还可测定以 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 为单位的电导率。因此，可以直接基于表 2 中的 ETDS 和电导率对紫色土的肥力水平进行判断。尽管水质测量笔在生产出厂时已进行校准，但在使用过程中测量准确度可能降低，最好使用标准电导率溶液进行校准。 25°C 条件下， 1 和 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液的标准电导率为 146 和 $1408 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[26]。基于 KCl 溶液的标准电导率和本研究中 ETDS 与电导率的相关关系， 400 、 250 、 200 、 100 和 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ETDS 值对应的 KCl 溶液的摩尔浓度分别为 4.06 、 2.58 、 2.08 、 1.10 和 $0.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，质量浓度分别为 302.8 、 192.3 、 155.4 、 81.7 、 $44.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。为使用方便和尽可能保障测定准确性，可以配制浓度为 50 、 80 、 150 、 200 和 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液作为紫色土肥力高低和盐分是否异常的参比溶液 (表 2)。基于上述结果，本研究提出的种植户直接使用水质测量笔表征紫色土肥力水平的落地措施为：线上或线下购买水质测量笔、氯化钾和可用于溶液配制的量器，采用纯净水配制不同浓度

的 KCl 参比溶液; 紫色土的容重均值约为 $1.29 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[27], 可按质量比 1 : 2.5 或体积比 1 : 3.2 制备待测悬液; 混匀并稍加平衡后便可采用水质测量笔测定悬液电导率, 待测悬液后续还可用于土壤 pH 测定; 根据表 2 的判断标准, 直接基于测定的 ETDS 或电导率进行土壤肥力水平判断, 或进一步将测定结果与 KCl 参比溶液进行比对后确定待检土

样的肥力水平。虽然土壤电导率与肥力指标之间的关系为土壤管理提供了便捷手段, 但在实际应用过程中仍需谨慎。因为土壤肥力受多种因素影响, 单一的电导率指标可能无法全面反映土壤健康状况, 对于电导率数值异常的土样还需做更细致的检测分析, 如结合其他土壤诊断方法和施肥管理调查, 以确保农业实践中的决策更加科学合理。

表 2 土水比 1 : 2.5 条件下, 基于 ETDS、电导率或 KCl 标准溶液浓度的土壤肥力水平判断标准

Table 2 Criteria for assessing soil fertility levels based on equivalent total dissolved solids, electrical conductivity, or KCl standard solution under a soil-to-water ratio of 1: 2.5

土壤肥力水平 Soil fertility level	ETDS / (mg·L ⁻¹)	电导率 Electrical conductivity / (μS·cm ⁻¹)	KCl 标准溶液 KCl standard solution / (mg·L ⁻¹)
高 High	≥250	≥350	≥200
较高 Relatively high	200~250	300~350	150~200
中等 Medium	100~200	150~300	80~150
较低 Relatively low	50~100	100~150	50~80
低 Low	<50	<100	<50
盐分异常 High soil salinity	≥400	≥600	≥300

4 结 论

廉价的水质测量笔在测定非盐渍化土壤紫色土的电导率时具有较好的稳定性和准确性, 可以在野外对土壤电导率进行速测。所测定的 ETDS 与紫色土碱解氮、有效磷、速效钾、水溶性钙、水溶性镁等肥力指标间均具有极显著的正相关性, 可在一定程度上反映土壤养分含量水平。速测 ETDS 与土壤肥力综合指数值间相关性达到了极显著水平, 可以采用 ETDS 值来表征土壤肥力等级的高低。ETDS (土水比 1: 2.5) ≥250 mg·L⁻¹ 时土壤样品的肥力等级为高、200~250 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为较高、100~200 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为中等、50~100 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为较低、<50 mg·L⁻¹ 时土壤肥力等级为低。但当 ETDS ≥400 mg·L⁻¹ 时, 需注意是否存在因过量施肥或其他因素引起的土壤盐分含量偏高的问题。

参考文献 (References)

- [1] Fan H Z, Chen Q R, Qin Y S, et al. Soil carbon sequestration under long-term rice-based cropping systems of purple soil in Southwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14 (12): 2417—2425.
- [2] Ci E, Tang J, Lian M S, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese soil taxonomy[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (3): 569—584.[慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究[J]. 土壤学报, 2018, 55 (3): 569—584.]
- [3] Li C P, Li X, Wang X, et al. Effect of the acidification environment on exchangeable cations and acid buffering capacity of weathering products of purple parent rock[J]. 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[J]. 土壤学报, 2024, 61 (1): 258—271.]
- [4] Zhu B, Chen S, You X, et al. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (5): 743—749. [朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J]. 土壤学报, 2002, 39 (5): 743—749.]
- [5] Wang D. Effects of different fertilization treatments on soil improvement of *Camellia oleifera* forest in purple soil water and soil erosion area[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018. [王迪. 不同施肥处理对紫色土水土侵蚀区油茶林土壤的改良效果[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.]
- [6] Xie S. Study on fertility and stoichiometric ratio of

- carbon, nitrogen and phosphorus in purplish soil in the woodland of Sichuan basin[D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2022. [谢顺. 四川盆地林地紫色土肥力及其碳、氮、磷化学计量比研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2022.]
- [7] Cai Z C. Discussion on the strategies for development of the subdiscipline of soil fertility and soil nutrient cycling for the 14th Five-Year Plan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1128—1136.[蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1128—1136.]
- [8] Zhang H, Li M Q, Cheng W J, et al. Investigation of soil quality of greenhouse vegetables in Tianjin[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023 (6): 41—49. [张慧, 李梦琦, 程文娟, 等. 天津市设施蔬菜土壤质量调查研究[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (6): 41—49.]
- [9] Mokarram M, Hojati M. Using ordered weight averaging (OWA) aggregation for multi-criteria soil fertility evaluation by GIS (case study: Southeast Iran) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 132: 1—13.
- [10] Wu H B, Zhang Q Q, Liang J. A comprehensive evaluation method of soil fertility quality in urban green space[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51 (4): 795—800.[伍海兵, 张青青, 梁晶. 城市绿地土壤肥力质量综合评价方法初探[J]. 土壤通报, 2020, 51 (4): 795—800.]
- [11] Yang Z D, Zhou Q W, Wang W, et al. Preliminary study on a fuzzy comprehensive evaluation-based method for classifying the degree of soil fertility damage of cultivated land[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42 (12): 2780—2786.[杨振铎, 周其文, 王伟, 等. 基于模糊综合评价法的耕地土壤肥力损害分级方法[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42 (12): 2780—2786.]
- [12] Corwin D L, Yemoto K. Measurement of soil salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83 (1): 1—2.
- [13] Moret-Fernández D, Vicente J, Aragüés R, et al. A new TDR probe for measurements of soil solution electrical conductivity[J]. Journal of Hydrology, 2012, 448/449: 73—79.
- [14] National Forestry Administration. LY/T 1251-1999. Analysis methods of water soluble salts of forest soil[S].
- [15] Jiang J, Li C B, Zhao A Z, et al. Determination of equilibrium time of ions in reaction in soil-water system by measuring electrical conductivity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (6): 989—995. [姜军, 李成保, 赵安珍, 等. 土壤-水体系中离子反应平衡时间的电导法检测[J]. 土壤学报, 2006, 43 (6): 989—995.]
- [16] Lu R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [17] Wang J G, Yang L Z, Shan Y H. Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38 (2): 176—183. [王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报, 2001, 38 (2): 176—183.]
- [18] Li Z Y, Cheng Y Y, Song W, et al. Fuzzy synthetic evaluation of purple soil fertility in Chongqing City[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (23): 238—247. [李忠意, 程永毅, 宋伟, 等. 重庆紫色土养分的模糊综合评判[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (23): 238—247.]
- [19] Chen J J, Yu J F, Li Z Y, et al. Ameliorating effects of biochar, sheep manure and chicken manure on acidified purple soil[J]. Agronomy, 2023, 13 (4): 1142.
- [20] Jing Y Y. Study on the characteristic of purple soil electric conductivity in the hilly region of Sichuan basin[D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2005. [敬芸仪. 四川盆地丘陵区紫色土电导率特性研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2005.]
- [21] Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. 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[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.]
- [22] Yu T R, He Q, Jiang B F, et al. Study on electrochemical characteristics of soil i . Relationship between conductivity and fertility of paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1959 (S2): 145—158. [于天仁, 何羣, 蒋柏藩, 等. 土壤电化学特性的研究—— I .水稻土的电导与其肥力的关系[J]. 土壤学报, 1959 (S2): 145—158.]
- [23] Zhou H Y, He Y R, Zhang B H, et al. Electrical conductivity and fertility evaluation of stagnant anthroposols in the typical region of upper reaches of the Yangtze River[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2003, 16 (1): 86—89. [周红艺, 何毓蓉, 张保华, 等. 长江上游典型区水耕人为土的电导率与肥力评价探讨[J]. 西南农业学报, 2003, 16 (1): 86—89.]
- [24] Liu G M, Yang J S. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32 (S1): 85—87. [刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32 (S1): 85—87.]

- [25] Deng L J, Gao X S, Jing Y Y, et al. Study on electrical conductivity and fertility evaluation of purple soil in the hilly region of Sichuan basin[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2007, 44 (4): 883—886. [邓良基, 高雪松, 敬芸仪, 等. 四川盆地丘陵区紫色土电导率与肥力评价探讨[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2007, 44 (4): 883—886.]
- [26] Hou C J. Conductivity of potassium chloride aqueous solution at different temperatures[J]. Measurement Technique, 1982, 26 (3): 1—4. [候传嘉. 不同温度下氯化钾水溶液的电导率[J]. 计量技术, 1982, 26 (3): 1—4.]
- [27] Li A W, Li W D, Song L Y, et al. Methods of filling in bulk density gaps of cropland topsoil in the Sichuan Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (1): 40—53. [李艾雯, 李文丹, 宋靓丽, 等. 四川盆地耕地表层土壤容重缺失数据填补方法[J]. 土壤学报, 2025, 62 (1): 40—53.]

(责任编辑: 檀满枝)