DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.05.022 **CSTR: 32214.14.tr202410100403**

王烨, 高磊, 王艳玲, 等. 冬闲绿肥对红壤季节性干旱抵御能力的影响. 土壤, 2025, 57(5): 1137–1144.

冬闲绿肥对红壤季节性干旱抵御能力的影响①

王 烨[1,2], 高 磊[2*], 王艳玲[1], 钟 湧[2], 彭新华[3*]

(1 南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044; 2 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 为探究冬闲绿肥对红壤抵御季节性干旱能力的调节作用, 以第四纪红黏土和红砂岩两种母质发育红壤为研究对象, 研究了冬闲和冬闲绿肥两种处理对红壤抗旱能力的影响。结果发现, 相比冬闲处理, 冬闲绿肥处理显著改变了红壤的理化性质, 增加了土壤饱和含水量、有效孔隙度、有机碳和全氮含量, 降低了土壤容重和凋萎含水量。经过 3 年的冬闲绿肥处理, 第四纪红黏土和红砂岩发育红壤耕层土壤有机碳含量分别提高 14.9% 和 13.8%, 全氮含量分别提高 16.3% 和 12.1%。同时, 冬闲绿肥处理提高了红壤对季节性干旱的抵御能力, 第四纪红黏土和红砂岩发育红壤的旱季有效水含量在 0 ~ 60 cm 土层显著提升, 特别是季节性干旱严重的 2022 年, 第四纪红黏土发育红壤 20 ~ 40 cm 土层有效含水量提高幅度达 271.5%。冬闲绿肥处理对红壤旱季有效含水量的贡献大于母质和土壤深度, 贡献比例分别为 55.3%、23.8% 和 19.4%。该研究为冬闲绿肥处理提升红壤抵御季节性干旱能力提供了直接证据, 冬闲绿肥处理通过提升红壤的质量增强了其对季节性干旱的抵御能力, 是红壤区值得推荐的土壤抵御季节性干旱的措施。

关键词: 土壤母质; 土壤有效含水量; 季节性干旱; 土壤培肥; 土壤结构

中图分类号: S156.6 **文献标志码:** A

Effect of Winter Green Manure on Seasonal Drought Resistance of Red Soil

WANG Ye[1,2], GAO Lei[2*], WANG Yanling[1], ZHONG Yong[2], PENG Xinhua[3*]

(1 *College of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *China*; 3 *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Given the increasing challenges posed by seasonal drought in regions with red soils, this study aimed to assess the regulatory effects of winter fallow (CK) and winter green manure (CK+GM) on the drought resistance of red soil, focusing on soils derived from two parent materials: Quaternary red clay and red sandstone. The results showed that compared to CK treatment, CK+GM treatment significantly changed the physicochemical properties of the red soil, in which increased soil saturated moisture content, effective porosity, contents of organic carbon and total nitrogen, while reduced soil bulk density and wilting moisture content. After three years of CK+GM treatment, soil organic carbon increased by 14.9% and 13.8%, and total nitrogen increased by 16.3% and 12.1% in soils derived from Quaternary red clay and red sandstone, respectively. Meanwhile, CK+GM treatment improved the resilience of red soil to seasonal drought. Under CK+GM treatment, the effective moisture contents of soils derived from Quaternary red clay and red sandstone were significantly increased in the 0–60 cm soil layer during the dry season. In particular, during the severe seasonal drought in 2022, the effective soil moisture content was increased by 271.5% in the 20–40 cm layer of red soil derived from Quaternary red clay. The contribution of winter green manure treatment to the effective soil moisture content of red soil during the dry season was 55.3%, which was greater than those of the parent material (23.8%) and soil depth (19.4%). This study provides direct evidence that winter green manure treatment enhances the resistance of red soil to seasonal drought by improving soil quality, and demonstrates that it is a recommended measure for soil resistance to seasonal drought in red soil areas.

Key words: Soil parent material; Effective soil moisture content; Seasonal drought; Soil fertilization; Soil structure

---

①基金项目: 井冈山农高区省级“揭榜挂帅”项目(20222-051261)、中国科学院先导 A 课题(XDA0440202)和国家自然科学基金项目(42077012)资助。

* 通信作者(lgao@issas.ac.cn; pengxinhua@caas.cn)

作者简介: 王烨(1998—), 女, 江苏江阴人, 硕士研究生, 主要从事红壤季节性干旱研究。E-mail: chole1015@163.com

红壤作为我国重要的地带性土壤资源，在国民经济建设中发挥着重要的作用[1]。在亚热带季风气候和板结贫瘠土壤特征的共同作用下，我国南方红壤区面临着严峻的季节性干旱问题，制约了红壤生态与生产功能的发挥。近年来，在全球变暖大背景下，红壤区的季节性干旱问题更为突出，给当地的农业生产和生态平衡带来了严峻挑战[2]，以 2022 年为例，红壤区遭遇了近 60 年来最为严重的夏秋连旱[3]，对农业生产和粮食安全造成了巨大的危害。

土壤培肥是应对季节性干旱的有效手段[4]。肥沃的土壤通常意味着良好的土壤结构，土壤培肥能提高其水分库容[5]，扩大作物根系的生长空间[6]，还可以增强作物对土壤水分吸收的能力[7]。杜臻杰[8]研究发现，化肥和有机肥的合理配施可以改善土壤团粒结构，增强土壤的持水性能，进而提升土壤的抗旱能力。绿肥种植是土壤培肥的重要途径，众多研究表明，绿肥种植可以显著提升土壤的理化性质和生物特性。具体地，绿肥种植能够有效降低土壤容重，提高土壤的通气透水性，增加土壤的养分含量及其有效性，改变土壤微生物网络结构[9-12]。况胜剑等[13]研究表明，夏季绿肥通过根系在土壤中的穿插提高土壤的入渗能力，通过冠层遮荫减少土壤的蒸发，起到良好的抗旱作用。然而，目前关于冬闲绿肥种植对夏季作物抗旱能力的研究较为有限。

成土母质影响着红壤的抗旱能力。不同的母质条件会导致土壤的结构和肥力水平的差异，进而影响其抗旱性能，但是，关于不同母质发育红壤的抗旱能力，目前尚存在争议。例如，张立存[14]通过模拟研究发现，相较于红砂岩发育的红壤，第四纪红黏土发育的红壤为作物提供了更有利的生长环境，能够有效减缓表层土壤变干的速度[15]，从而更能抵御季节性干旱[16]。而王珏等[17]研究发现，红砂岩发育的红壤在肥力等级上优于第四纪红黏土发育的红壤，暗示在抗旱方面红砂岩更具优势。因此，冬闲绿肥种植对红壤抵御夏秋季频繁的季节性干旱的影响，特别是第四纪红黏土和红砂岩发育红壤的不同响应，仍需进一步研究。

基于此，本研究通过田间控制试验，探究两种典型母质发育红壤中冬闲绿肥种植对夏季作物抗旱能力的影响，以为红壤区抗旱措施的选择提供理论依据，也为未来气候变化背景下农业的可持续发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在江西省鹰潭市余江区的中国科学院鹰潭红壤生态实验站(28°15′N，116°55′E)开展。江西省地属典型红壤区，为亚热带季风气候，雨热资源丰富，但年内分布不均，50% 以上降水出现在 3—6 月，随后的 7—10 月通常高温少雨，易发生季节性干旱。研究期间(2021 年 1 月—2023 年 12 月)，研究区日平均气温 19.1 ℃，最高日均温度达 41.3 ℃，最低值为 –7.6 ℃，年平均潜在蒸散发量 877.7 mm，年平均降水量 1 602.9 mm。其中，3—6 月的月均降水量是全年均值的 1.8 倍，而该时期的潜在蒸散发量低于全年平均水平；7—10 月的月均降水量不到全年均值的 50%，而潜在蒸散发量却是全年均值的 1.5 倍。因此，3—6 月通常为该地区的雨季，而 7—10 月为季节性干旱季(图 1)。从干旱程度上看，2022 年的季节性干旱最为严重，2023 年相对湿润，2021 年居中。

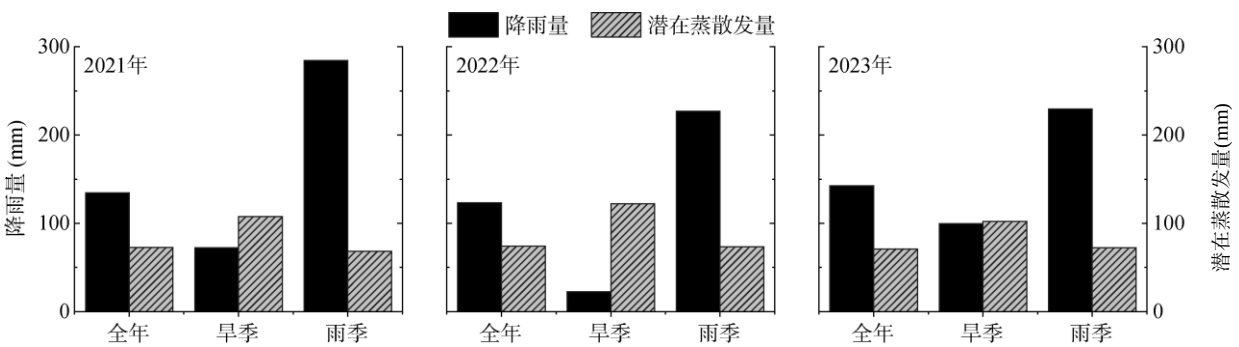


图 1 2021—2023 年全年、旱季和雨季月均降雨量及潜在蒸散发量

Fig. 1 Monthly average rainfall and potential evapotranspiration for the whole year, dry season, and rainy season from 2021 to 2023

1.2 试验设计

本试验在长宽各为 2 m 的小区开展，小区采用回填土的方式布设，回填深度为 1 m。供试土壤为 2 种母质发育的红壤，母质分别为第四纪红黏土和红砂岩。在本研究的研究周期 2021 年 1 月—2023 年 12 月，每年种植一季农作物，作物类型为玉米(掖单 13)，

通常在 4 月初种植，7 月底收获，研究期内无灌溉。每种母质设置 2 种绿肥处理：冬闲处理(CK)和冬季绿肥处理(CK+GM)。CK 处理即每年夏季种植玉米，冬季土地空闲。CK+GM 处理夏季与 CK 处理保持一致，而在冬季种植肥田萝卜，根据土壤墒情在 9—10 月撒播肥田萝卜，第二年 3 月份将肥田萝卜翻压还田，还田深度为 0 ~ 15 cm，肥田萝卜的生长情况和气候以及土壤母质有关，生物量约在 37.5 ~ 62.5 t/hm^2。每个小区采用相同的施肥方法和施肥量，施肥量为 120 kg/hm^2 的氯化钾、300 kg/hm^2 的过磷酸钙和 120 kg/hm^2 的尿素。每个处理设置 3 个重复，共 12 个小区。两种母质发育的红壤质地(美国制)差异显著，第四纪红黏土和红砂岩发育红壤的黏粒含量分别为 48.6% 和 22.7%，粉粒分别为 31.6% 和 16.6%，砂粒分别为 19.8% 和 60.7%。

1.3　指标测定

1) 土壤含水量：在每个小区预埋 1 根 100 cm 长的特制 PVC 管，利用便携式 TDR(Trime PICO, IMKO, Ettlingen, Germany)动态测定土壤水分，监测频率为每 2 周 1 次，研究期间共测定 69 次。测定深度为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm，每个深度每次测定 2 个重复，取其均值，共获得 2 484 个土壤水分数据。

2) 土壤水分特征曲线：2022 年 10 月，在每个小区用钢制环刀采集 0 ~ 20 cm 土层的原状土壤样品，密封后带回实验室，用水浸泡饱和后，称重用以计算饱和含水量。将饱和样品放入离心机，设置 8 个离心机转速，分别为 310.1、980.6、2 192.7、2 773.6、3 100.9、5 371.1、6 933.9 和 9 806.1 r/min，对应吸力分别为 10、100、500、800、1 000、3 000、5 000 和 10 000 hPa，待离心机达到设定转速并稳定时开始计时，对应时间分别为 10.0、26.2、48.5、55.1、58.2、73.4、80.5 和 90.1 min，离心完成后取出环刀，擦干环刀外表水分后称重，得到该吸力下的土壤含水量，继续进行下一个更高转速的离心。完成全部转速离心后，将环刀及土样放入 105 ℃ 的烘箱烘干至恒重，计算样品的容重，用以将质量含水量换算为体积含水量。

以土壤水吸力为横坐标，以土壤体积含水量(cm^3/cm^3)为纵坐标，借助 Van Genuchten 模型[18]拟合土壤水分特征曲线，模型的表达式为：

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[1 + (a \cdot h)^n\right]^{-m} \tag{1}$$

式中：θ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3)；h 为压力水头(cm)；θ_r 和 θ_s 分别代表土壤的残余含水量和饱和含水量(cm^3/cm^3)；(cm^{-1})和 n 是经验拟合系数，$m = 1 - 1/n$。

利用拟合的水分特征曲线，可以获得各样品的凋萎含水量，即 15 000 hPa 吸力下的土壤体积含水量，实测的土壤体积含水量与凋萎含水量之差即为土壤有效含水量：

$$\theta_{有效含水量} = \theta_{实测} - \theta_{(\Psi = 15000\,hPa)} \tag{2}$$

利用拟合的水分特征曲线，计算得到不同尺寸的土壤孔隙占比。在一个非饱和的土体内，将土壤内部孔隙假设为由许多不同直径的圆形毛管组成，当土壤水吸力主要由土壤中的某一孔径的毛管力作用产生时，土壤基质吸力[19]可表示为：

$$S = \frac{4\gamma\cos\psi}{D} \tag{3}$$

式中：S 为土壤吸力，hPa；γ 为水的表面张力，其值为 75×10^{-3} N/m；对于常规土壤，土水界面的接触角 Ψ 通常很小，因此 Ψ 通常设置为 0；D 为毛细管当量直径，mm。因此，公式(3)可简化计算相应吸力下土壤的当量孔径(公式(4))，由此得到各项孔隙分布(表 1)。

$$D = \frac{3}{S} \tag{4}$$

表 1　土壤孔隙指标的计算

Table 1　Calculation of soil pore indexes

指标	主要性能	等效水势范围
大孔隙	>50 μm	$\theta_{(\Psi = 0hPa)} - \theta_{(\Psi = 60hPa)}$
中孔隙	0.2 ~ 50 μm	$\theta_{(\Psi = 60hPa)} - \theta_{(\Psi = 15000hPa)}$
微孔隙	<0.2 μm，即萎蔫点	$\theta_{(\Psi = 15000hPa)}$
有效孔隙	有效水填充的孔隙	$\theta_{(\Psi = 0hPa)} - \theta_{(\Psi = 15000hPa)}$
通气容量	衡量土壤通气能力的孔隙	$\theta_{(\Psi = 0hPa)} - \theta_{(\Psi = 330hPa)}$

3) 其他土壤理化指标：2022 年 10 月，在每个小区 3 个不同位置采集 0 ~ 20 cm 扰动土样，混合均匀后，去除其中石块、根系等杂物，自然风干后过 10 目筛，采用吸管法测定土壤颗粒组成；过 100 目筛测定土壤有机碳和全氮含量。以上基本土壤理化性质均参照《土壤农业化学分析方法》测定[20]。

1.4　数据处理与分析

利用 Excel 2007 软件进行数据整理和初步分析，采用 SPSS18.0 软件进行 Pearson 相关分析、单因素方差分析(One-way ANOVA)、独立 t 检验(Independent-samples t-test)和多因素方差分析(MANOVA)，利用广义线性模型量化各因素对土壤水分的贡献。绘图采用 Origin 2024 软件。

2　结果与分析

2.1　冬闲绿肥对红壤理化性质的影响

冬闲绿肥(CK+GM)处理有效改善了红壤的理化

属性(表 2)。物理指标方面，当成土母质为第四纪红黏土时，与 CK 处理相比，CK+GM 处理下的土壤饱和含水量和通气容量分别显著提高了 6.0% 和 20.0%，土壤凋萎含水量显著降低了 9.5%；当成土母质为红砂岩时，CK+GM 处理下的饱和含水量、有效孔隙和通气容量分别显著提高 7.9%、25.0% 和 43.8%。化学指标方面，CK+GM 处理对两种母质红壤的有机碳和全氮含量均有重要影响。对于第四纪红黏土发育红壤，与 CK 处理相比，CK+GM 处理下的有机碳和全氮分别显著提高了 14.9% 和 16.3%；对于红砂岩发育红壤，则分别显著提高了 13.8% 和 12.1%。

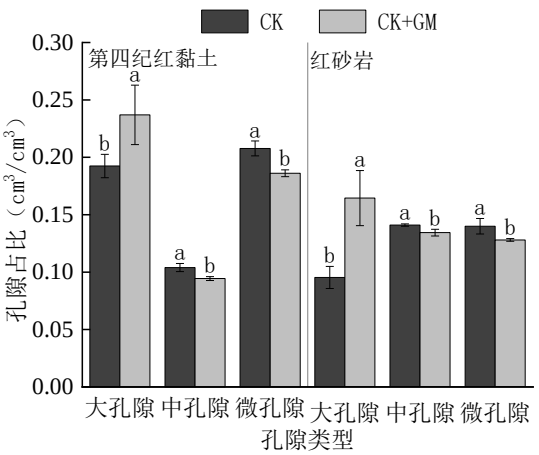
表 2 冬闲绿肥处理下两种母质红壤的基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of red soils derived from two parent materials under winter green manure treatment

土壤理化指标	第四纪红黏土发育红壤		红砂岩发育红壤	
	CK	CK+GM	CK	CK+GM
土壤容重(g/cm^3)	1.13 ± 0.01 a	1.08 ± 0.02 b	1.27 ± 0.04 a	1.19 ± 0.01 b
饱和含水量(cm^3/cm^3)	0.50 ± 0.00 b	0.53 ± 0.01 a	0.38 ± 0.01 b	0.41 ± 0.02 a
有效孔隙(cm^3/cm^3)	0.30 ± 0.01 a	0.33 ± 0.03 a	0.24 ± 0.02 b	0.30 ± 0.02 a
凋萎含水量(cm^3/cm^3)	0.21 ± 0.01 a	0.19 ± 0.00 b	0.14 ± 0.02 a	0.12 ± 0.02 a
通气容量(cm^3/cm^3)	0.25 ± 0.01 b	0.30 ± 0.00 a	0.16 ± 0.02 b	0.23 ± 0.02 a
土壤有机碳(g/kg)	4.10 ± 0.18 b	4.71 ± 0.09 a	4.49 ± 0.12 b	5.11 ± 0.19 a
土壤全氮(g/kg)	0.43 ± 0.01 b	0.50 ± 0.03 a	0.33 ± 0.00 b	0.37 ± 0.03 a

注：同行不同小写字母表示同一土壤不同处理间差异显著(P<0.05)，下同。

CK+GM 处理改善了红壤孔隙分布。对于两种土壤母质，CK+GM 处理均显著增加了大孔隙占比，减少了中孔隙和微孔隙的数量(图 2)。当母质为第四纪红黏土发育红壤时，与 CK 处理相比，CK+GM 处理下的大孔隙占比显著提升了 22.9%，中孔隙显著降低了 9.2%，微孔隙显著降低了 10.4%；当母质为红砂岩发育土壤时，与 CK 处理相比，CK+GM 处理下的大孔隙占比显著提升了 72.8%，中孔隙显著降低了 4.7%，微孔隙显著降低了 8.5%。



(图中不同小写字母表示土壤孔隙指标在两种处理间差异显著(P<0.05)，下同)

图 2 冬闲绿肥处理下两种母质发育红壤的孔隙分布

Fig. 2 Pore distributions of red soils derived from two parent materials with winter green manure treatment

2.2 冬闲绿肥对红壤水分时间动态变化的影响

2021—2023 年两种母质红壤水分时间动态显示(图 3)，CK+GM 处理提高了土壤水分含量，但影响的深度主要在耕层以下，无论雨季还是旱季，第四纪红黏土和红砂岩发育红壤均表现出该规律。不同的是，在第四纪红黏土发育红壤上，CK+GM 处理提高了 20 cm 以下土层的土壤水分，而在红砂岩发育红壤上仅 40 ~ 60 cm 土层土壤水分有响应。以整个研究期为例，对于第四纪红黏土发育红壤，CK+GM 处理显著提高了 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层的土壤水分，提高幅度分别为 17.0% 和 11.9%(表 3)，而对于 0 ~ 20 cm 土层的土壤水分无显著影响。对于红砂岩发育红壤，CK+GM 处理仅显著提高了 40 ~ 60 cm 土层的水分含量，提高幅度为 9.8%。

不同年份和不同季节，CK+GM 处理对土壤水分的影响有所不同。2021 年，旱季(7—10 月)，与 CK 处理相比，CK+GM 处理显著提升了第四纪红黏土发育红壤 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层的水分，提高比例分别为 14.0% 和 11.3%，而仅显著提升红砂岩发育红壤 40 ~ 60 cm 土层土壤水分 10.4%；雨季，CK+GM 处理对土壤水分的提高幅度更大，上述三者提高幅度

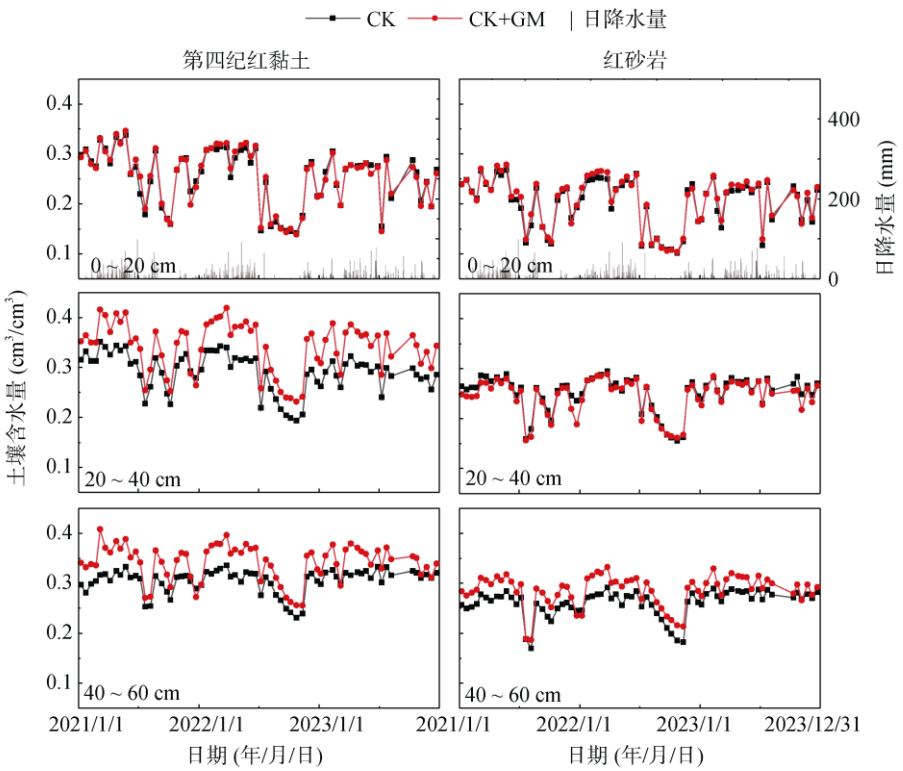


图 3　冬闲绿肥处理下两种母质红壤土壤体积含水量动态变化

Fig. 3　Dynamics of volume water contents of red soils derived from two parent materials with winter green manure treatment

表 3　冬闲绿肥处理下红壤含水量的基本统计特征

Table 3　Statistical characteristics of red soil moisture contents with winter green manure treatment

土层深度(cm)	含水量 (cm^3/cm^3)	第四纪红黏土发育红壤		红砂岩发育红壤	
		CK	CK+GM	CK	CK+GM
0 ~ 20	平均值	0.25 a	0.26 a	0.20 a	0.21 a
	最大值	0.34	0.35	0.27	0.28
	最小值	0.14	0.14	0.10	0.10
	变异系数(%)	22.1	22.3	24.1	24.0
20 ~ 40	平均值	0.29 b	0.34 a	0.25 a	0.24 a
	最大值	0.35	0.42	0.29	0.29
	最小值	0.19	0.23	0.16	0.16
	变异系数(%)	13.4	14.7	14.1	14.5
40 ~ 60	平均值	0.30 b	0.34 a	0.26 b	0.29 a
	最大值	0.34	0.41	0.29	0.33
	最小值	0.23	0.26	0.17	0.19
	变异系数(%)	7.9	10.5	10.3	11.0

分别为 17.0%、18.0% 和 12.1%。2022 年季节性干旱最为严重，该年旱季月均降水量仅为全年平均降水量的 18%，而雨季月均降水量为全年均值的 1.8 倍。旱季，CK+GM 处理分别显著提升了第四纪红黏土发育红壤 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层土壤水分 17.1% 和 10.6%，显著提升了红砂岩发育红壤 40 ~ 60 cm 土层土壤水分 10.7%；雨季，三者分别显著提升了 20.8%、16.5% 和 12.1%。在 3 年研究期间，2023 年季节性干旱最不明显。旱季，CK+GM 处理分别显著提升了第四纪红黏土发育红壤 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层土壤水分 20.0% 和 9.9%，红砂岩发育红壤 40 ~ 60 cm 土层土壤水分仅提高 6.6%；雨季，三者分别显著提升了 20.1%、14.2% 和 9.2%。

2.3　冬闲绿肥对旱季红壤有效含水量的影响

季节性干旱期土壤有效水库容对于作物生长发育至关重要。结果(图 4)显示，相比于 CK 处理，CK+GM 处理显著提高红壤 0 ~ 60 cm 土层旱季土壤有效含水量。对于第四纪红黏土发育红壤，2021 年、2022 年和 2023 年 0 ~ 20 cm 土层有效含水量分别提高 227.9%、37.1% 和 19.8%，20 ~ 40 cm 土层 3 个水文年有效含水量分别提高 83.1%、271.5% 和 95.1%，40 ~ 60 cm 土层分别提高 58.6%、69.4% 和 40.6%。对于红砂岩发育红壤，0 ~ 20 cm 土层土壤有效含水量在 3 个水文年的旱季分别提高 135.9%、150.7% 和 44.9%，20 ~ 40 cm 土层分别提高 19.7%、36.8% 和 9.8%，40 ~ 60 cm 分别提高 52.1%、52.8% 和 30.3%。总体上，第四纪红黏土发育红壤旱季的有效水库容对冬闲绿肥的响应强于红砂岩发育红壤。随着土壤深度增加，两种母质红壤的有效含水量均显著升高，在季节性干旱最为严

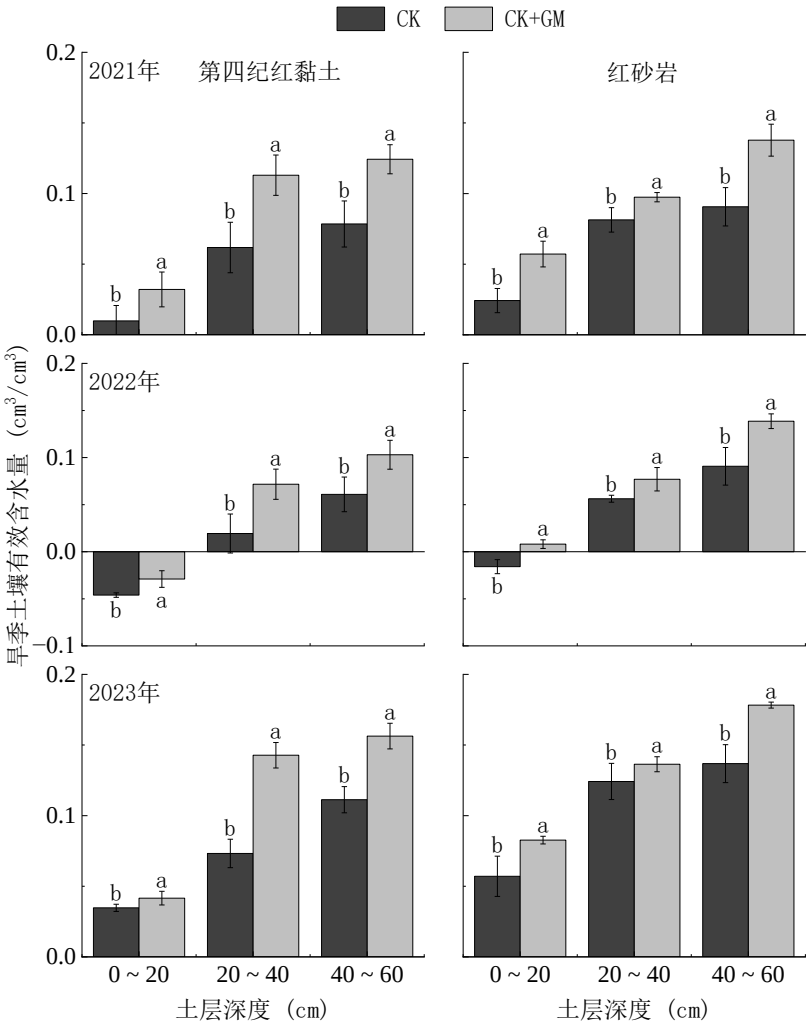


图 4 2021—2023 年旱季(7—10 月)3 个深度土壤有效含水量

Fig. 4 Effective soil moisture contents at three depths during dry season (July-October) between 2021 and 2023

重的 2022 年度，CK+GM 处理对旱季土壤有效含水量的提升效果最为显著。

土层深度、母质和冬闲绿肥 3 因素对 0 ~ 60 cm 土层旱季红壤有效水含量影响的多因素方差分析结果(表 4)显示，土层深度在 $P<0.001$ 水平上显著影响旱季土壤有效水含量，冬闲绿肥在 $P<0.01$ 水平上显著影响土壤有效水含量，而母质在 $P<0.05$ 水平上显著影响土壤有效水含量。土层深度、冬闲绿肥和母质 3 个因素对旱季土壤有效水含量的贡献依次为 55.3%、23.8%和 19.4%，而三者交互作用的贡献不到 2.0% (图 5)。

表 4 土层深度、母质和冬闲绿肥对旱季土壤有效含水量影响的方差分析

Table 4 Variance analysis of effects of soil depth, parent material and winter green manure treatment on effective soil moisture content during dry season

因素	df	*F* 值	*P* 值
土层深度	2	79.790	<0.001
母质	1	4.983	<0.05
冬闲绿肥	1	8.328	<0.01
土层深度×母质	2	1.439	0.247
土层深度×冬闲绿肥	2	0.443	0.645
母质×冬闲绿肥	1	0.369	0.546
土层深度×母质×冬闲绿肥	2	4.366	<0.05

3 讨论

3.1 冬闲绿肥处理有利于提高红壤土壤质量

红壤是一种相对贫瘠、存在明显物理障碍的土壤类型[21]。本研究发现，冬闲绿肥处理有效改善了红壤的理化属性。一个主要的变化是，与 CK 处理相比，CK+GM 处理促进了土壤碳氮的积累，经过 3 年处理，第四纪红黏土发育红壤的有机碳含量提高了 14.9% ($P<0.05$)，红砂岩发育红壤提高了 13.8%($P<0.05$)。土壤有机碳含量是土壤质量最为重要的指示指标[22]，直接影响土壤的养分供给能力，同时，土壤有机碳也

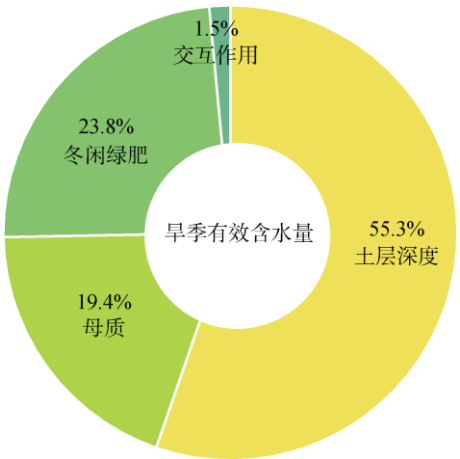


图 5　土层深度、母质和冬闲绿肥对旱季红壤有效含水量的贡献

Fig. 5　Contributions of soil depth, parent material and winter green manure treatment to effective moisture content of red soil during dry season

关系到土壤中微生物的数量和多样性[23]，健康的土壤微生物网络又进一步增强了土壤有机碳的转化效率，提高养分的活性。Khatoon 等[24]的研究发现，微生物可以将易分解的有机碳转化成可以长期在土壤中固存的形态，提升土壤碳的封存和土壤功能的稳定，也因此有利于提高作物对自然胁迫的抵御能力，以维持产量稳定[25]。本研究中冬闲绿肥处理在改善土壤养分状况方面的结果与前人研究结果基本一致[26-27]。在此基础上，本研究的结果还表明，冬闲绿肥处理能改善红壤的孔隙结构，主要表现在显著增加了大孔隙的占比，第四纪红黏土发育红壤中 >50 m 的孔隙增加了 22.9% (P<0.05)，红砂岩发育红壤中增加了 72.8%(P<0.05)(图 2)。土壤孔隙结构与水文功能密切相关，孔隙状况影响水分在土壤中的传输方式和储存时间[28]，进而影响水分功能的发挥。因此，土壤水力属性也常被作为土壤质量的重要指标[29]。冬闲绿肥处理一方面通过根系的穿插直接影响土壤孔隙结构[30]，由于耕作的扰动，这部分作用主要体现在耕层以下不被耕作影响的深度。另一方面，绿肥通过自身有机物质的转换间接改变土壤孔隙结构[31]。土壤有机碳和土壤孔隙结构之间存在显著的相关性，均是土壤质量水平的关键指标。因此，冬闲绿肥处理能显著提升红壤的健康水平。

3.2　冬闲绿肥处理提升了红壤的抗旱能力

土壤干旱胁迫危及作物生长和发育，在全球变暖的背景下，红壤区季节性干旱对作物产量的威胁不断增加，提高红壤对季节性干旱的抵御能力对该地区农业的可持续发展至关重要。本研究发现，冬闲绿肥处理能显著提高两种母质发育红壤旱季 0 ~ 60 cm 土层的有效含水量(图 4)。土壤有效水分的持有能力是衡量土壤抗旱能力的关键指标。虽然，过去的研究已证明绿肥能提高土壤的持水能力[32]，但是，冬闲绿肥种植对夏季作物抗旱能力的研究比较欠缺。本研究结果为冬闲绿肥在红壤抵御季节性干旱功能方面的作用提供了直接证据。红壤旱季有效含水量状况受到一系列因素的共同影响，本研究的结果显示，土壤深度是影响土壤有效水分含量最为重要的因素，其次是冬闲绿肥处理，其超过了母质的作用，3 个因素的贡献分别为 55.3%、23.8% 和 19.4%(图 5)。土壤深度越大，土壤受到蒸发的影响越小，这也是红壤区深层土壤通常具有更高含水量的原因[33]。本研究选择的是两种结构对比极为显著的红壤母质，其在土壤颗粒组成和养分含量方面均具有显著差异。但是，尽管如此，冬闲绿肥处理的贡献仍高于土壤母质，这表明冬闲绿肥处理在改善红壤抗旱能力方面的作用突出。近年，红壤地区旱地在冬季多闲置，而红壤区冬季的水分和热量条件优异，在冬闲季节种植绿肥，一方面可以提供大量牧草，另一方面，可以很好地改善土壤质量状况，增强红壤在季节性干旱期的抗旱能力，如果再配合无人机播种，可以大幅降低冬闲绿肥管理的人工成本，是将来非常有应用前景的红壤改良措施。

4　结论

1) 冬闲绿肥处理改善了红壤的理化性状。相比于 CK 处理，CK+GM 处理显著增加了红壤的饱和含水量、有效孔隙度、土壤有机碳和全氮含量，显著降低了土壤容重和凋萎含水量。冬闲绿肥处理对土壤性质的影响在第四纪红黏土和红砂岩发育红壤之间存在一定差异。

2) 冬闲绿肥处理有效提升了红壤对季节性干旱的抵御能力。与 CK 处理相比，CK+GM 处理显著提高了红壤 0 ~ 60 cm 土层旱季的有效含水量，但提高程度度受母质类型的影响，总体上第四纪红黏土母质的改善作用强于红砂岩母质。

3) 土壤深度、冬闲绿肥和母质共同影响红壤有效含水量。冬闲绿肥的贡献大于母质，是未来一种具有很好应用前景的红壤改良措施。

参考文献：

[1]　赵其国，黄国勤，马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615–7622.

[2]　Zeng Z Q, Wu W X, Peñuelas J, et al. Increased risk of flash droughts with raised concurrent hot and dry extremes under global warming[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2023, 6: 134.

[3] Zhang L X, Yu X J, Zhou T J, et al. Understanding and attribution of extreme heat and drought events in 2022: Current situation and future challenges[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2023, 40(11): 1941–1951.
[4] 吕金岭，吴儒刚，范业泉，等. 干旱条件下施肥与作物抗旱性的关系[J]. 江西农业学报, 2012, 24(2): 6–10.
[5] 黎丽娜. 长期不同施肥及施肥措施改变后红壤性水稻土孔隙变化特征[D]. 长沙：湖南农业大学, 2020.
[6] 杨朔，胡仁，侯俊，等. 根区施肥条件下氮肥品种及施氮量对玉米苗期根系特征及生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 111–119.
[7] 王欣欣，卜一，李尽朝，等. 限额补灌及施肥水平对浅埋滴灌玉米生长发育、产量及水分利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(16): 62–68.
[8] 杜臻杰. 长期施肥条件下典型红壤养分、水分的时空变异及水肥耦合研究[D]. 南京：南京农业大学, 2009.
[9] 王强盛, 薄雨心, 余坤龙, 等. 绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望[J]. 土壤, 2021, 53(2): 243–249.
[10] 黄不凡. 绿肥、麦秸还田培养地力的研究——I.对土壤有机质和团聚体性状的影响[J]. 土壤学报，1984，21(2): 113–122.
[11] 高嵩涓，曹卫东，白金顺，等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. 土壤学报，2015，52(4): 902–910.
[12] 董青君, 董玉兵, 李卫红, 等. 不同绿肥对土壤肥力及后茬水稻养分吸收的影响[J]. 土壤, 2023, 55(3): 554–561.
[13] 况胜剑，廖恒，姚单君，等. 我国夏季绿肥的种植及利用现状研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(20): 62–68.
[14] 张立存. 不同母质红壤下干旱胁迫对草本植物生长的影响[J]. 江西农业学报, 2022, 34(11): 76–80.
[15] 徐武峰，倪烈，赵仲仁. 不同肥力红壤旱地对季节性干旱条件的响应特征[J]. 湖南农业科学，2018(11): 56–58, 62.
[16] 李成亮，孔宏敏，何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. 水土保持学报，2004，18(6): 116–119.
[17] 王珏，周卫军，商贵铎，等. 不同母质柑橘园土壤养分特征及肥力综合评价[J]. 生态学杂志，2022，41(5): 933–940.
[18] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898.
[19] 王玥凯. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和作物生长的影响[D]. 北京：中国科学院大学, 2020.
[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科学技术出版社, 2000.
[21] D'Angelo B, Bruand A, Qin J T, et al. Origin of the high sensitivity of Chinese red clay soils to drought: Significance of the clay characteristics[J]. Geoderma, 2014, 223: 46–53.
[22] Mahmood S, Nunes M R, Kane D A, et al. Soil health explains the yield-stabilizing effects of soil organic matter under drought[J]. Soil & Environmental Health, 2023, 1(4): 100048.
[23] Szoboszlay M, Dohrmann A B, Poeplau C, et al. Impact of land-use change and soil organic carbon quality on microbial diversity in soils across Europe[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2017, 93(12).
[24] Khatoon H, Solanki P, Narayan M, et al. Role of microbes in organic carbon decomposition and maintenance of soil ecosystem[J]. International Journal of Chemical Studies, 2017, 5(6): 1648–1656.
[25] Fang W, Zhong X M, Peng X H, et al. Soil quality mediates the corn yield in a thin-layer mollisol in NorthEast China[J]. Land, 2023, 12(6): 1187.
[26] 张学昕. 不同施肥处理对甘肃河西干旱区棉田土壤有机质和氮素的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(1): 37–44.
[27] 高旭，周路阔，郭婷，等. 湖南郴州烟区土壤有机质和全氮时空变异及其影响因素研究[J]. 土壤通报，2020，51(3): 686–693.
[28] Ju X N, Gao L, She D L, et al. Impacts of the soil pore structure on infiltration characteristics at the profile scale in the red soil region[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 236: 105922.
[29] Bagnall D K, Morgan C L S, Mac Bean G, et al. Selecting soil hydraulic properties as indicators of soil health: Measurement response to management and site characteristics[J]. Soil Science Society of America Journal, 2022, 86(5): 1206–1226.
[30] 樊志龙，柴强，曹卫东，等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. 应用生态学报，2020，31(4): 1389–1402.
[31] Xu L Y, Wang M Y, Shi X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. Science of The Total Environment, 2018, 631/632: 1243–1250.
[32] 高荣锴. 冬季覆盖作物调控红壤区夏玉米抗旱的效果与途径[D]. 武汉：华中农业大学, 2023.
[33] Gao L, Peng X H, Biswas A. Temporal instability of soil moisture at a hillslope scale under subtropical hydroclimatic conditions[J]. Catena, 2020, 187: 104362.