

不同类型覆盖作物与玉米套作对紧实红壤的响应^①

熊 鹏¹, 陈 旭¹, 罗泽军¹, 杨 茜¹, 黄尚书², 张中彬³, 彭新华^{1,4}

(1 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2 江西省红壤及种质资源研究所, 南昌 331717; 3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 4 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 在江西省吉安市井冈山农高区设置了红壤不压实和压实处理, 以玉米单作为对照, 进行夏季覆盖作物(大豆、田菁和苏丹草)与玉米套作试验, 分析了不同类型覆盖作物与玉米套作对紧实红壤的响应。结果表明: 土壤压实限制了大豆根系的生长, 总根长减少了 26%, 而苏丹草的根系直径较粗, 受土壤压实影响相对较小。不压实处理下, 玉米套作苏丹草的土壤含水量比玉米套作田菁和大豆分别增加 16% 和 21%; 与玉米单作相比, 玉米套作苏丹草、田菁或大豆均显著提高了玉米地上生物量, 其中玉米套作大豆能促进玉米对有效氮的吸收, 致使土壤中碱解氮含量降低 22%, 其玉米地上生物量最高。压实处理下, 玉米套作田菁或大豆相对于玉米单作显著增加了玉米地上生物量, 而玉米套作苏丹草则没有显著促进玉米生长; 与玉米套作田菁或大豆相比, 土壤压实对玉米套作苏丹草下的玉米地上生物量没有显著影响。因此, 在不压实土壤中, 玉米套作大豆是南方红壤区较为适宜的种植模式, 可以促进玉米的生长; 在压实土壤中, 玉米套作田菁或大豆可以提高玉米地上生物量, 而玉米套作苏丹草则对紧实红壤不太敏感。

关键词: 覆盖作物; 土壤容重; 套作; 根系构型

中图分类号: S156.6 **文献标志码:** A

Response of Different Cover Crops and Maize Relay Intercropping to Compacted Red Soil

XIONG Peng¹, CHEN Xu¹, LUO Zejun¹, YANG Xi¹, HUANG Shangshu², ZHANG Zhongbin³, PENG Xinhua^{1,4}

(1 College of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2 Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 4 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In this study, non-compacted and compacted treatments of red soil were established in Jinggangshan Agricultural High-Tech Zone, Ji'an City, Jiangxi Province, and different summer cover crops (soybean, sesbania, and sudangrass) and maize relay intercropping experiments were conducted with monocropped maize as a control (CK), to analyze the response of different cover crops and maize relay intercropping to compacted red soil. The results showed that soil compaction limited soybean root growth with a 26% reduction in total root length. In contrast, sudangrass had a greater root diameter and was less affected by soil compaction. Under non-compacted conditions, soil water content increased by 16% and 21% in maize relay intercropped with sudangrass compared to in maize relay intercropped with sesbania and soybean, respectively. Additionally, maize relay intercropped with sudangrass, sesbania or soybean significantly increased above-ground biomass of maize compared to CK. Among these, maize relay intercropped with soybean promoted the uptake of available nitrogen by maize and resulted in the reduction of alkali-hydrolyzable nitrogen content of the soil by 22%, and its above-ground biomass of maize was the highest. Under compacted conditions, maize relay intercropped with sesbania or soybean significantly increased maize above-ground biomass relative to CK, while maize relay intercropped with sudangrass did not significantly promote maize growth, and soil compaction did not significantly affect maize above-ground biomass under maize relay intercropped with sudangrass compared to maize relay intercropped with sesbania or soybean. Therefore, in non-compacted soil, maize relay intercropped with soybean is a more suitable cropping pattern in the southern red soil area, which can promote maize growth. And in compacted soil, maize relay

①基金项目: 井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051261-2-2), 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200445)和大学生创新创业训练计划项目(S20241041020)资助。

作者简介: 熊鹏(1992—), 男, 湖南石门人, 博士, 讲师, 研究方向为土壤与作物根系生长。E-mail: pxiong@jxau.edu.cn

intercropped with sesbania or soybean can increase maize above-ground biomass, while maize relay intercropped with sudangrass is less sensitive to compacted red soil.

Key words: Cover crop; Soil bulk density; Relay intercropping; Root architecture

红壤是我国南方地区非常重要的土壤资源,总面积为 218 万 km^2 , 约占国土总面积的 23%, 却支撑了全国 40% 的人口, 在我国农业经济和社会发展中占据重要的地位^[1]。然而, 红壤由于黏粒含量高, 有机质含量低, 养分贫瘠, 加之长期不合理的开发利用, 导致红壤紧实、变硬等土壤退化问题突出^[2]。当土壤紧实程度过高时, 作物根系难以下扎, 根系的生长及养分的利用受到限制, 最终影响作物产量^[3-4]。因此, 如何有效地改良红壤结构和促进作物根系生长, 对于提高我国红壤生产力以及红壤资源可持续利用具有重要理论与现实意义。

利用覆盖作物发达的根系改良土壤结构是一种非常前景的措施^[5-7], 常见的覆盖作物种植模式有套作、间作和轮作等。套作是在同一田块, 先种植前季作物, 再在前季作物行间种植后季作物的一种种植模式。与传统单作不同, 套作可以利用不同类型作物根系特征之间的差异, 充分利用地上部和地下部的资源, 如增加作物水分利用效率、提高氮素和磷素的利用率、促进作物根系生长、增加生物多样性及控制杂草和病虫害等, 最终促进作物增产和生产力稳定性提高^[8-10]。在南方红壤区, 由于水热条件好, 积极发展套作是促进农作物生长、提高红壤生产力的重要措施之一。然而, 目前适合与主粮作物套作的作物品种有很多, 且效果各不相同。禾本科粮食作物与豆科作物套作如玉米套作大豆是较为典型的套作方式, 一方面大豆通过根瘤固氮可以向玉米转移较多的氮素, 从而促进玉米对氮素的吸收利用, 另一方面还可以减少氮肥的投入, 提高养分利用效率^[11-12]。此外, 与小麦单作相比, 玉米和小麦等禾本科粮食作物之间进行套作也可以提高小麦产量, 但是必须施用一定的氮肥^[13]; 玉米套作苜蓿可以很好地控制杂草, 促进玉米和苜蓿生物量的积累^[14]。

近年来, 在南方红壤区由于常年浅旋耕等不合理的耕作措施, 致使红壤结构障碍突出, 根系分布较浅, 限制了土壤生产力的发挥^[15]。尽快筛选出根系发达且穿透土壤能力强的作物品种, 并与粮食作物进行套作是提高红壤生产力的重要措施之一。有研究表明, 高丹草、田菁和苜蓿等覆盖作物的根系穿透紧实土壤的能力强, 适合在东北黑土区生长^[16]。然而, 目前适合在南方红壤区种植的夏季覆盖作物品种仍不清

楚, 与粮食作物套作的效果也不明确。因此, 本研究对紧实红壤下不同类型覆盖作物与玉米套作的响应进行了研究, 探讨了不同套作模式对土壤理化性质和粮食作物生长的影响, 以期筛选合适的套作模式, 为我国南方红壤区耕地质量提升和农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于江西省吉安市井冈山农高区科研基地($27^{\circ}6'15''\text{N} \sim 27^{\circ}6'40''\text{N}$, $114^{\circ}51'50''\text{E} \sim 114^{\circ}52'30''\text{E}$)。该区属亚热带湿润性气候, 年平均气温 18.3°C , 年平均降水量 1 458 mm。供试土壤为发育于第四纪红黏土的红壤, 其中黏粒($<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.002 \sim 0.05\text{ mm}$)和砂粒($0.05 \sim 2\text{ mm}$)含量(V/V)分别为 34.36%、34.21% 和 31.43%, 按美国制土壤质地分类, 为黏壤土。研究区红壤旱地主要种植油料作物和经济作物, 以油菜-花生(玉米、芝麻、大豆)轮作模式和玉米大豆间作模式为主, 耕作方式多为浅旋耕。

1.2 试验设计

试验开始于 2023 年 4 月。试验设置不压实和压实 2 个主处理, 每个主处理下设置 4 个副处理, 分别是单作玉米、玉米套作大豆、玉米套作田菁和玉米套作苏丹草, 共 8 个处理, 每个处理 3 个重复, 一共 24 个小区, 每个小区长 5 m、宽 4 m。压实处理通过小型拖拉机连续碾压 2 ~ 4 次完成, 不压实处理利用旋耕机浅旋 15 cm 左右, 压实处理则不旋耕。氮肥(N)、磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)施用量分别为 147.5、90 和 90 kg/hm^2 。2023 年 4 月 26 日, 进行玉米播种, 玉米株行距为 $25\text{ cm} \times 60\text{ cm}$; 6 月 21 日, 在玉米行间分别以人工撒种的方式套作覆盖作物(大豆、田菁和苏丹草), 播种量分别是 45、75 和 45 kg/hm^2 。覆盖作物收获后的秸秆均匀地平铺于土壤表层进行秸秆覆盖。

1.3 测定指标及方法

土壤基本性质测定^[17]: 2023 年玉米收获后进行土壤样品采集, 采样深度为 0 ~ 20 cm, 其中环刀样品用 100 cm^3 不锈钢环刀采集, 表层土样采用混合采样法采集。土壤容重采用环刀法测定, 土壤含水量采用烘干法测定, pH 采用电位法测定, CEC(阳离子交换量)采用乙酸铵交换法测定, 土壤有机质采用重铬

酸钾氧化-外加热法测定,全氮采用半微量凯氏定氮法测定,全磷采用硫酸+高氯酸消解-钼锑抗比色法测定,全钾采用硫酸+高氯酸消解-火焰光度计法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。

覆盖作物根系测定:对于不压实和压实处理下大豆、田菁和苏丹草等覆盖作物,收获后不同小区选择代表性植株将根系从土壤中完整挖出并用清水冲洗干净后,用 EPSON 根系扫描仪进行扫描,然后通过 WinRHIZO 软件测定根系体积、表面积、长度和直径等二维根系特征参数。

玉米地上生物量测定:每个小区的玉米收获后,割掉地上部(不包含玉米棒),放入 85°C 烘箱中烘干至恒重得到地上生物量。

1.4 数据处理与统计分析

土壤容重、含水量、pH、CEC、有机质、全量养分、速效养分等理化性质,覆盖作物根系特征(总根长、根体积、根表面积和根直径)和玉米地上生物量采用 Excel 2016 和 Origin Pro 9.1 软件进行数据处理、分析与作图,不同类型覆盖作物与玉米套作对紧

实红壤响应的方差分析、土壤养分与玉米地上生物量的相关性分析则在 SPSS 22.0 统计软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同类型覆盖作物根系对紧实红壤的响应

图 1 为不压实和压实处理下不同类型覆盖作物的根系构型。土壤压实对大豆根系构型影响较大,导致大豆的总根长显著减少了 26% (图 2A),而田菁和苏丹草则受土壤压实的影响较小。无论土壤是否压实,大豆的根长均显著大于田菁和苏丹草,不压实处理下分别高出 211% 和 156%,压实处理下分别高出 54% 和 83%。对于根体积,苏丹草明显大于田菁和大豆,不压实处理下分别提高了 146% 和 45%,压实处理下分别提高了 125% 和 179%(图 2B)。不压实处理下,与田菁相比,大豆和苏丹草的根表面积分别显著增加了 127% 和 30%(图 2C);而在土壤压实处理下,3 个覆盖作物品种的根表面积无显著差异。苏丹草的根系直径在不压实和压实处理下分别比田菁显著增加了 48% 和 67%,比大豆显著增加了 95% 和 131%(图 2D)。土壤压实对 3 个覆盖作物品种的根体积、根表面积、根直径没有显著影响。

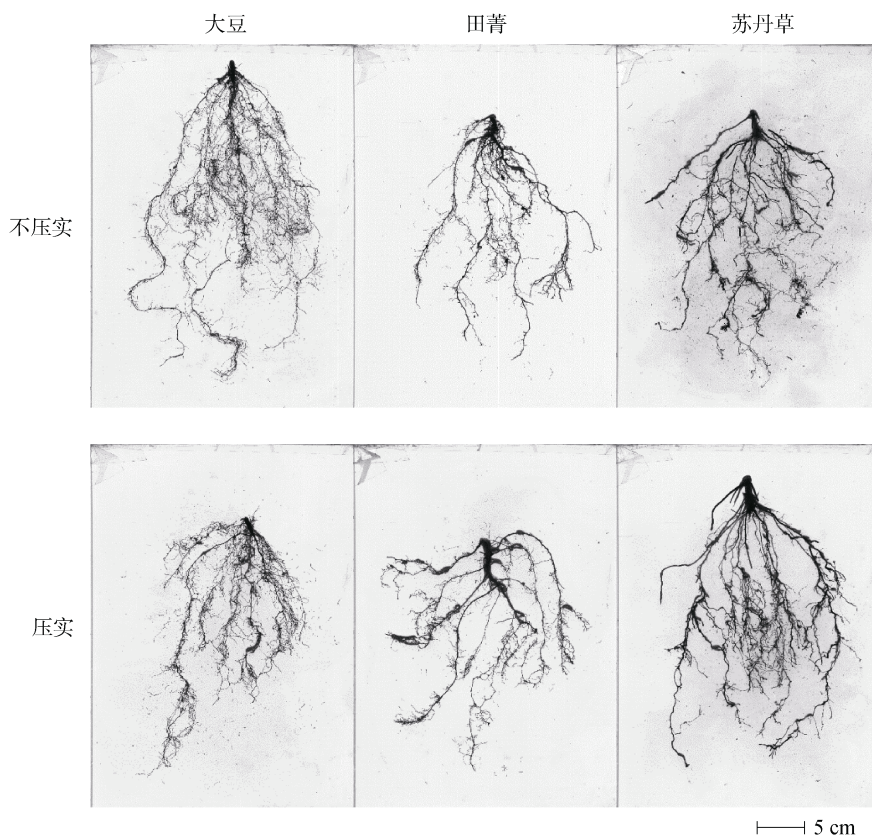
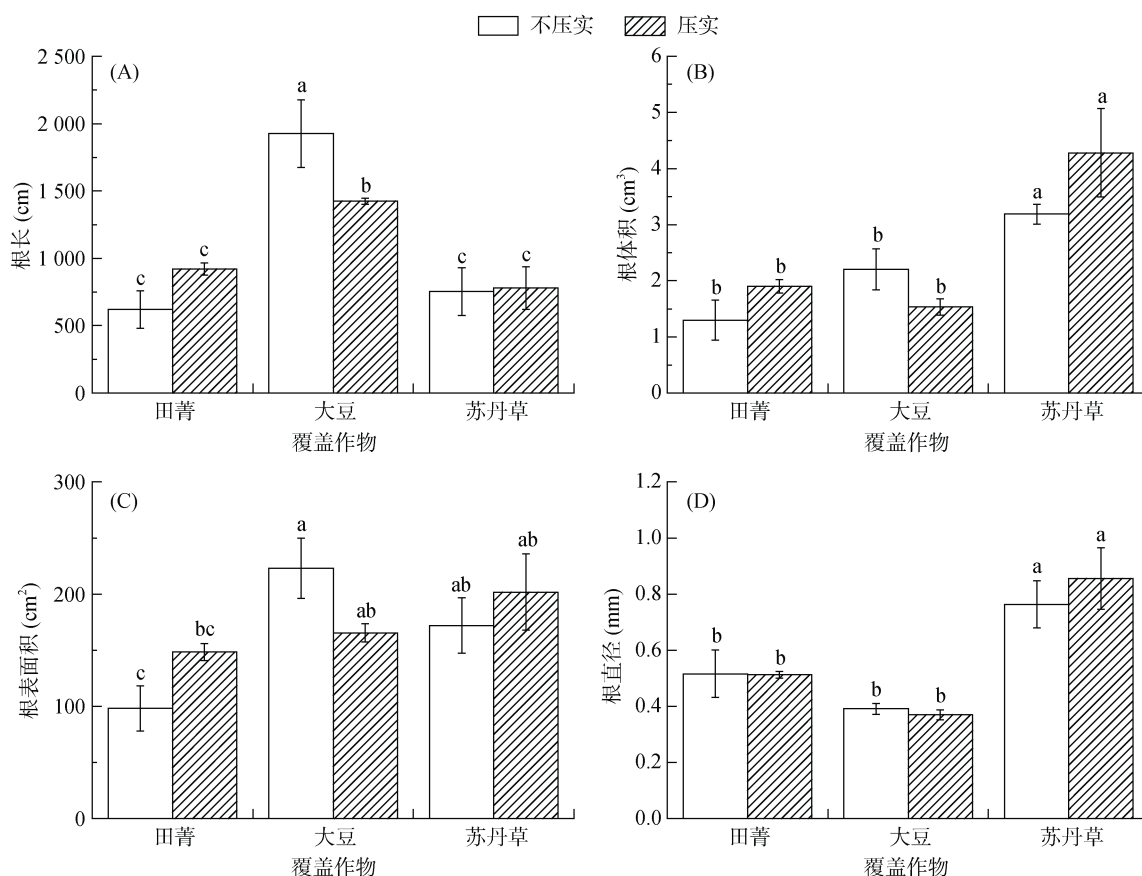


图 1 红壤不压实和压实条件下不同类型覆盖作物根系构型

Fig. 1 Root architectures of different cover crops under non-compacted and compacted treatments of red soil



(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$), 下同)

图 2 红壤不压实和压实条件下不同类型覆盖作物根系特征

Fig. 2 Root traits of different cover crops under non-compacted and compacted treatments of red soil

2.2 不同类型覆盖作物与玉米套作对土壤理化性质的影响

压实处理下,玉米单作和玉米套作土壤容重均显著高于不压实处理,平均增加的幅度在 8%~10%(图 3A);与玉米单作相比,不同类型覆盖作物与玉米套作对土壤容重没有显著影响。土壤压实对土壤含水量没有显著影响(图 3B);不压实处理下,玉米套作苏丹草土壤含水量显著高于玉米套作田菁和大豆,分别增加 16% 和 21%。压实处理下,与玉米单作相比,玉米套作苏丹草显著提高了土壤有机质含量,增加了 30%;而在不压实处理中二者没有显著性差异;不压实处理下,玉米套作苏丹草土壤有机质含量显著高于玉米套作大豆,提高了 34%。不压实处理下,玉米套作苏丹草土壤全钾含量显著高于玉米单作,增加了 8%;无论土壤是否压实,玉米套作苏丹草下土壤全钾含量均显著高于玉米套作田菁和大豆。不压实处理下,与其他种植模式相比,玉米套作大豆显著降低了土壤碱解氮含量,其中相对于玉米单作显著降低了 22%;压实处理下,玉米套作大豆土壤碱解氮含量反而高于不压实处理下,增加了 26%。在不压实处理下,

玉米套作苏丹草土壤速效钾含量显著高于玉米套作大豆,提高了 48%;而在压实处理下,玉米套作苏丹草相比于玉米单作、玉米套作田菁和大豆均显著提高了速效钾含量,分别增加了 65%、41% 和 57%。玉米套作苏丹草体系中,土壤速效钾在压实土壤中的含量反而高于不压实土壤,高出 34%。然而,土壤压实对 pH、全氮、全磷、有效磷和 CEC 没有显著的影响;与玉米单作相比,玉米套作田菁(大豆、苏丹草)也没有改变土壤 pH、全氮、全磷、有效磷和 CEC(表 1)。

2.3 不同类型覆盖作物与玉米套作对玉米地上生物量的影响

与玉米单作相比,不压实处理下,玉米套作田菁、大豆、苏丹草均显著提高了玉米地上生物量,其中玉米套作大豆下的玉米地上生物量最高,均显著高于玉米套作田菁和苏丹草,分别增加了 41% 和 65%;而在压实处理下,与玉米单作相比,玉米套作田菁或大豆显著增加了玉米地上生物量,而玉米套作苏丹草则没有显著提高玉米地上生物量(图 4)。在土壤压实处理下,对于玉米套作田菁、大豆、苏丹草 3 种体系,

玉米地上生物量没有明显差异。玉米套作大豆或田菁受土壤压实的影响较大,玉米地上生物量分别减少了 31% 和 51%,而土壤压实对玉米套作苏丹草影响较小。在不压实处理下,对玉米单作和玉米套作大豆体系下土壤碱解氮和玉米地上生物量进行相关性分析,

发现玉米地上生物量与土壤碱解氮含量呈显著的负相关关系(图 5; $r = -0.83$, $P < 0.05$),这表明不压实处理下玉米套作大豆可以显著提高玉米对有效氮的吸收,促进玉米的生长,而土壤中碱解氮的含量则显著降低。

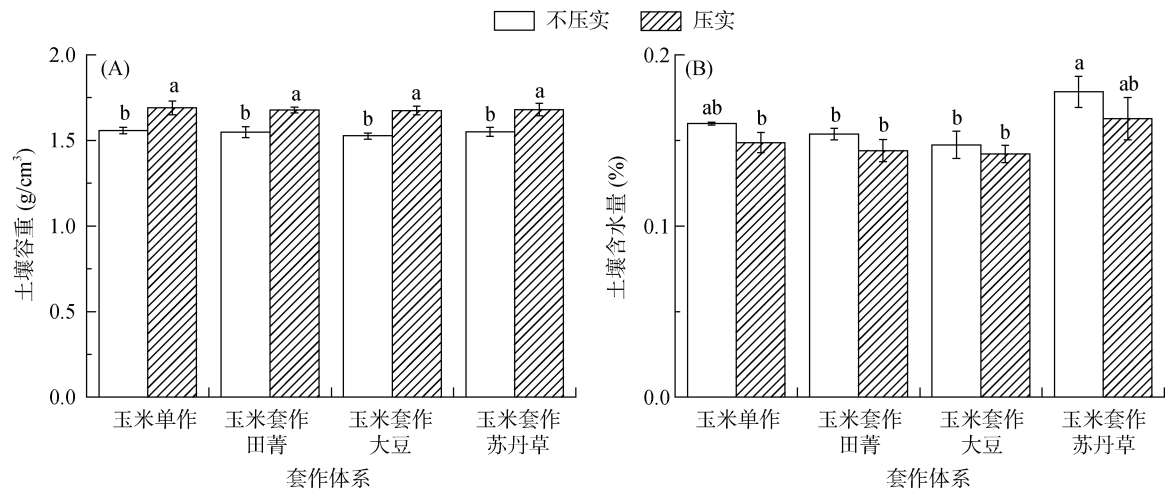


图 3 不同套作体系下土壤容重和含水量
Fig. 3 Soil bulk densities and moistures under different relay intercropping systems

表 1 不同套作体系下土壤理化性质
Table 1 Soil physiochemical properties under different relay intercropping systems

处理	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
不压实+玉米单作	5.22 a (0.21)	8.37 abc (0.14)	0.52 a (0.01)	0.20 a (0.01)	9.00 c (0.29)	61.25 a (4.90)	2.66 a (0.86)	101.67 bc (4.41)	7.78 a (0.28)
压实+玉米单作	5.05 a (0.13)	6.92 bc (0.29)	0.46 a (0.01)	0.20 a (0.01)	9.03 bc (0.22)	63.70 a (1.23)	2.68 a (0.45)	100.00 bc (21.79)	8.26 a (0.41)
不压实+玉米套作田菁	4.98 a (0.11)	8.33 abc (0.61)	0.52 a (0.04)	0.21 a (0.02)	9.00 c (0.19)	66.15 a (2.12)	5.30 a (2.88)	118.33 bc (17.40)	8.36 a (0.63)
压实+玉米套作田菁	5.00 a (0.06)	8.71 ab (0.94)	0.55 a (0.03)	0.17 a (0.03)	8.93 c (0.21)	61.25 a (4.42)	4.40 a (1.72)	116.67 bc (6.67)	7.82 a (0.21)
不压实+玉米套作大豆	5.15 a (0.09)	6.76 c (0.75)	0.44 a (0.05)	0.17 a (0.00)	9.07 bc (0.11)	47.78 b (4.24)	1.76 a (0.33)	83.33 c (6.67)	8.46 a (0.12)
压实+玉米套作大豆	4.98 a (0.08)	7.32 abc (0.27)	0.45 a (0.02)	0.21 a (0.01)	8.99 c (0.20)	60.03 a (4.90)	3.83 a (0.57)	105.00 bc (7.64)	8.26 a (0.09)
不压实+玉米套作苏丹草	5.05 a (0.05)	9.08 a (0.88)	0.54 a (0.05)	0.21 a (0.01)	9.69 a (0.10)	62.48 a (2.12)	2.58 a (0.80)	123.33 b (4.41)	8.53 a (0.10)
压实+玉米套作苏丹草	5.02 a (0.04)	8.98 a (0.74)	0.54 a (0.04)	0.23 a (0.01)	9.57 ab (0.05)	63.70 a (1.23)	5.19 a (1.47)	165.00 a (17.32)	7.82 a (0.58)

注：括号内数据表示标准误差，表中同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

不同类型覆盖作物穿透紧实土壤的能力存在差异。本试验中,土壤压实对大豆根系影响较大,而田菁和苏丹草受到土壤压实的影响较小(图 1、图 2),与以往研究结果较为一致。如, de Moraes 等^[18]研究发现大豆的根长密度随着土壤机械阻力的增加而减

少;王健豪等^[16]指出田菁可以在紧实的土壤中生长,其根系穿透能力较强;Calonego 等^[19]报道苏丹草的根系发达,能够生长至深层土壤,根系探索土壤资源的能力强。一般而言,作物根系在土壤中的穿透能力与其根系直径密切相关^[20]。因此,造成这一结果的原因可能是大豆的根系直径最小,致使其穿透紧实土壤的能力小于直径更大的苏丹草和田菁(图 2D)。在 3

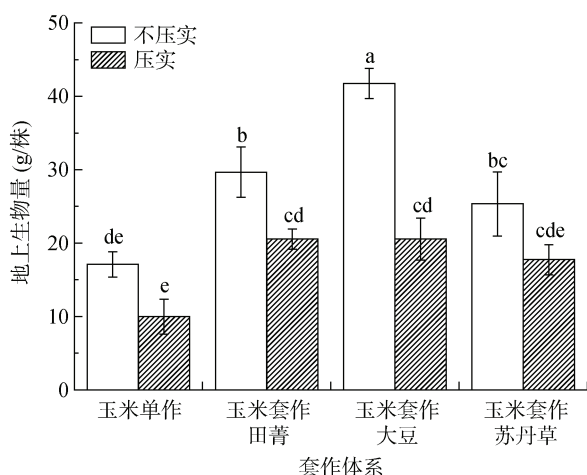


图 4 不同套作体系下玉米地上生物量

Fig. 4 Maize above-ground biomass under different relay intercropping systems

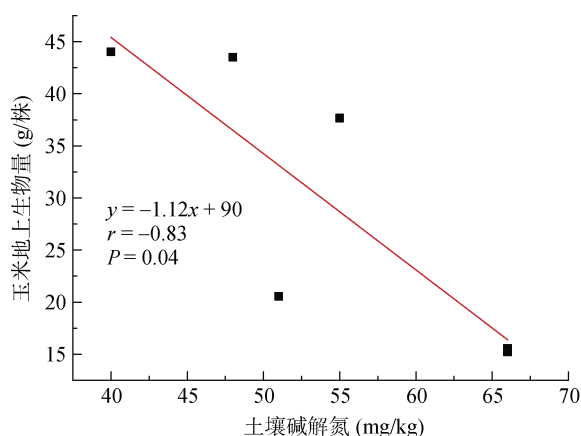


图 5 不压实处理下玉米单作和玉米套作大豆体系中土壤碱解氮含量与玉米地上生物量的相关性

Fig. 5 Correlations between soil alkali-hydrolyzable nitrogen content and maize above-ground biomass in monocropped maize system and maize relay intercropped with soybean system under non-compacted conditions

个覆盖作物品种中,苏丹草的根系直径显著大于田菁和大豆,因此其抗压实能力和根系穿透能力最强(图 2D),在土壤压实情况下可以与玉米进行套作。然而,在不压实处理下,大豆的总根长和根表面积要大于田菁和苏丹草,说明在土壤物理状况良好时,大豆可能更适合与玉米进行套作(图 2A、2C)。

本研究表明,与玉米单作相比,玉米套作田菁、大豆、苏丹草均没有显著影响土壤容重,这可能与套种时间较短有关(图 3A)。而不压实处理下,玉米套作苏丹草土壤含水量均高于玉米套作田菁或大豆,这可能是由于苏丹草的根系直径明显大于田菁和大豆,穿透土壤能力更强,能够吸收深层土壤水分以补充表层土壤(图 3B)。一些研究也表明,深根系的植物可以穿透表层较干的土壤进入下层湿润的土壤,有利于

水分的高效利用,具有提水作用^[9, 21]。本研究中,玉米套作苏丹草相比玉米单作、玉米套作大豆显著提高了土壤有机质、全钾和速效钾含量(表 1),与樊志龙等^[22]研究结果较为一致,其报道,在旱地上种植覆盖作物能够有效改善土壤的养分状况,增碳效果明显,但是不同类型覆盖作物由于根系构型的差异,致使其具有不同的改善效果。另外,本研究中,对于玉米套作苏丹草体系,压实土壤的速效钾含量却高于不压实土壤(表 1),这主要是因为苏丹草的根系受土壤压实的影响最小,在压实土壤中生长得更好,腐烂后更有利于土壤养分的积累。而对于土壤碱解氮,不压实处理下玉米套作大豆比玉米单作降低了 22%(表 1),与赵乾旭等^[23]研究结果相似,其发现,玉米与大豆套作能够有效促进玉米和大豆对土壤碱解氮的吸收,进而降低土壤碱解氮的残留。此外,在玉米套作大豆体系中,本研究还发现土壤压实显著增加了土壤碱解氮的含量(表 1)。很多研究也表明,大豆受土壤压实的影响较大,在紧实的土壤中大豆根系很难生长,其根长会受到很大的限制^[18, 24],这将减少根系对于有效氮的利用,从而导致土壤中有较多碱解氮残留。

本研究还表明,土壤压实显著影响了玉米套作田菁或大豆体系下玉米地上生物量,这是因为在压实处理中,土壤容重接近 1.7 g/cm^3 (图 3A),远远超过了限制作物根系生长的临界值 1.4 g/cm^3 ,当超过 1.6 g/cm^3 时,影响则更为严重^[25]。然而,在玉米套作苏丹草体系下,土壤压实对玉米地上生物量则没有显著影响,这可能是由于苏丹草更耐紧实,在苏丹草根系和玉米根系的相互作用下致使玉米受土壤压实的影响相对较小。另外,压实处理下,与玉米单作相比,玉米套作田菁或大豆显著促进了玉米生长,而玉米套作苏丹草则没有。造成这种结果的原因可能与豆科作物(大豆、田菁)与禾本科作物(玉米)之间的互补和促进作用有关^[9]。不管土壤是否压实,玉米套作田菁、大豆和苏丹草均提高了玉米的地上生物量,其中玉米套作大豆在不压实处理下对玉米地上生物量的促进作用最为明显(图 4)。这充分说明,夏季覆盖作物与玉米套作可以促进玉米的生长,而在不压实处理下大豆可以很好地生长,还能够将氮素转移给玉米,提高玉米对氮素的吸收利用^[26]。另外,本研究还发现,玉米地上生物量与土壤碱解氮含量呈显著的负相关关系(图 5),这也证明了大豆与玉米套作可以促进玉米对土壤有效氮的吸收,进而减少土壤碱解氮的残留。

4 结论

土壤压实显著增加了土壤容重,其中大豆生长受土壤压实的影响最大,而苏丹草根系直径更粗致使其对土壤压实不敏感。与玉米套作田菁或大豆相比,玉米套作苏丹草可以充分利用苏丹草根系穿透能力强的特征吸收深层水分以提高表层土壤含水量。不压实处理下,玉米套作田菁、大豆和苏丹草均显著促进了玉米生长,其中玉米套作大豆对玉米地上生物量的促进作用最为明显;压实处理下,玉米套作田菁或大豆显著提高了玉米地上生物量,而玉米套作苏丹草对玉米生长则没有显著影响。在玉米套作田菁、大豆和苏丹草3种套作体系中,玉米套作苏丹草受土壤压实的影响最小。

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] 金慧芳, 史东梅, 钟义军, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 84–93.
- [3] Obour P B, Ugarte C M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211: 105019.
- [4] 熊鹏, 郭自春, 李玮, 等. 淮北平原砂姜黑土玉米产量与土壤性质的区域分析[J]. 土壤, 2021, 53(2): 391–397.
- [5] Zhang Z B, Peng X H. Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: 104844.
- [6] 严磊, 张中彬, 丁英志, 等. 覆盖作物根系对砂姜黑土压实的响应[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 140–150.
- [7] 何阳波, 董俊琦, 曾蕙, 等. 香根草和紫花苜蓿水培根系分泌物缓解黏质红壤机械阻力模拟研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1224–1235.
- [8] 李孟浩, 李倩倩, 刘朋召, 等. 不同施氮水平下小麦/玉米套作群体产量和水氮利用[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 106–115.
- [9] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403–415.
- [10] Gou F, van Ittersum M K, Wang G Y, et al. Yield and yield components of wheat and maize in wheat-maize intercropping in the Netherlands[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 76: 17–27.
- [11] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统下作物氮素吸收和利用效率的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4473–4482.
- [12] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3170–3178.
- [13] 赵亚妮, 王科, 王佳锐, 等. 施氮对单作和套作小麦产量和氮素利用特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 845–852.
- [14] 张龙, 高峰, 付丹丹, 等. 不同施氮量和种植密度对苜蓿-玉米套作系统生产性能及杂草的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2020, 37(3): 172–182.
- [15] 蒋发辉, 高磊, 韦本辉, 等. 粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 588–596.
- [16] 王健豪, 张中彬, 钱泳其, 等. 东北薄层黑土区根系抗土壤压实的覆盖作物品种筛选[J]. 土壤, 2025, 57(1): 167–178.
- [17] 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.
- [18] de Moraes M T, Debiase H, Franchini J C, et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 200: 104611.
- [19] Calonego J C, Raphael J P A, Rigon J P G, et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 85: 31–37.
- [20] Clark L J, Whalley W R, Barraclough P B. How do roots penetrate strong soil? [M]//Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003: 93–104.
- [21] Sekiya N, Araki H, Yano K. Applying hydraulic lift in an agroecosystem: Forage plants with shoots removed supply water to neighboring vegetable crops[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1): 39–50.
- [22] 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.
- [23] 赵乾旭, 岳献荣, 夏运生, 等. 设施条件接种丛枝菌根真菌对紫色土上玉米/大豆生长及氮素利用的影响[J]. 作物杂志, 2016(5): 94–100.
- [24] Colombi T, Braun S, Keller T, et al. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils[J]. Science of The Total Environment, 2017, 574: 1283–1293.
- [25] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, et al. Using X-ray Computed Tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture[J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 110: 11–18.
- [26] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作对土壤氮素含量及氮素转移的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 148–158.