

耕作方式对辽西褐土区土壤穿透阻力的影响及机理

韩巍¹, 徐晓旭¹, 李冬¹, 张龙¹, 李娜^{1,2},
谭博元¹, 祝腾霄¹, 李嵩¹, 依艳丽¹

(1.沈阳农业大学土地与环境学院,沈阳 100866;2.辽宁省旱地农林研究所,辽宁 朝阳 122000)

摘要: 为了探明耕作方式转变对土壤物理性质的影响,研究设置田间定位试验,监测长期旋耕转变为免耕和深松耕后土壤容重、水分和穿透阻力的变化特征。试验设免耕(no tillage, NT)、深松(subsoiling, SS)、旋耕(rotary tillage, RT)3个处理,在玉米生长季监测土壤含水量、容重和穿透阻力动态,定量并分析土壤穿透阻力对含水量和容重变化的响应。结果表明,玉米生育期 NT 处理的土壤容重保持相对稳定,RT 和 SS 处理容重逐渐增大;与 RT 和 SS 处理相比,NT 处理增加 0—30 cm 的容重、0—45 cm 的含水量和 0—15 cm 的穿透阻力,但在干旱时期降低 15—45 cm 的穿透阻力,避免了土壤紧实对玉米的胁迫。基于含水量和容重参数,建立了预测土壤穿透阻力的指数模型,其 $P < 0.001$, R^2 为 0.77。模型结果表明,当容重 $> 1.4 \text{ g/cm}^3$ 且含水量 $< 0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,土壤穿透阻力将大于限制作物生长的阈值(2 MPa);在含水量 $< 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,土壤穿透阻力对含水量的敏感性显著高于容重,说明该区域干旱(水分)引起的土壤紧实度增加比压实更为重要。免耕有助于该区域保持土壤水分,同时降低容重增加导致的土壤紧实效应,有利于避免土壤紧实胁迫对作物生长的影响。

关键词: 土壤穿透阻力; 土壤容重; 土壤含水量; 免耕; 深松

中图分类号: S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0143-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.06.021

Effects of Tillage Methods on Soil Penetration Resistance and Its Mechanism in the Cinnamon Soil Area of Western Liaoning Province

HAN Wei¹, XU Xiaoxu¹, LI Dong¹, ZHANG Long¹, LI Na^{1,2},

TAN Boyuan¹, ZHU Tengxiao¹, LI Song¹, YI Yanli¹

(1.College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University,

Shenyang 100866; 2.Liaoning Institute of Dry Land Agroforestry, Chaoyang, Liaoning 122000)

Abstract: In order to illustrate the influence of changed tillage methods on the soil physical properties, field experiment was set up to monitor the variations of soil bulk density, water content, and soil penetration resistance after the change from rotary tillage (RT) to no-tillage (NT) and subsoiling (SS). Three treatments (RT, NT, and SS) were used to monitor the soil water content, bulk density, and penetration resistance in maize growing season, and quantitatively analyze the respond of soil penetration resistance to soil water content and bulk density changes. The results showed that soil bulk density was stable at 1.3 g/cm^3 in NT during a maize growing season, and increased gradually with time from 1.0 g/cm^3 to $1.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ at 0—15 cm depth in RT and SS. Compared with RT and SS, NT increased soil bulk density at 0—30 cm depth, water content at 0—45 cm depth, and penetration resistance at 0—15 cm depth, whereas NT reduced penetration resistance at 15—45 cm depth during the time of drought. An exponential model with soil bulk density and water content was developed to predict variation of penetration resistance ($P < 0.001$, $R^2 = 0.77$). Based on this model, if water content $< 0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ and soil bulk density $> 1.4 \text{ g/cm}^3$, penetration resistance was more than 2 MPa which is the threshold value of limiting root growth. If water content $< 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ and soil bulk density $> 1.2 \text{ g/cm}^3$, the sensitivity of penetration resistance to the soil water content was greater than to the soil bulk density, this indicated that the increase in penetration resistance caused by

收稿日期: 2020-04-04

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503116); 国家重点研发计划项目(2018YFD0300301); 国家自然科学基金项目(41501235, 4180071274)

第一作者: 韩巍(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤物理与保护性耕作研究。E-mail: hanweiguy@163.com

通信作者: 依艳丽(1961—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理研究。E-mail: yiyanni@126.com

drought in this area is more important than compaction. No-tillage could help to maintain soil water content in this area, reduced the soil compaction effect caused by the increased of bulk density, and avoid the impact of soil compaction stress on crop growth.

Keywords: soil penetration resistance; soil bulk density; soil water content; no-tillage; subsoiling

土壤穿透阻力指土壤基质抵抗外物楔入的能力,是反映土壤紧实度的重要指标,可以表征植物根系在生长过程中克服土粒之间的摩擦力和黏结力,直接决定作物根系的生长状况^[1-4]。土壤穿透阻力主要受到土壤质地、有机质含量、容重和含水量等因素的影响^[5-7]。对于一个质地和有机质含量相对稳定的土壤,其穿透阻力的大小主要决定于容重和含水量,但二者在不同范围内对土壤穿透阻力的影响不同。罗敏等^[8]研究表明,在含水量低于某一点时,土壤穿透阻力急剧下降,在不同土壤层次急剧下降点的含水量不同。在0—10 cm土层,含水量 $25\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时急剧下降,随着土层深度的增加,该含水量逐渐增大,可能与不同土层容重的差异有关;在含水量较高时,即使容重变化很大,其对土壤穿透阻力的影响也较小^[6]。因此,在研究土壤紧实度时,必须同时考虑土壤容重和含水量的变化特征。

耕作方式直接影响土壤容重和含水量的时空变化^[9],进而影响土壤穿透阻力的变异^[6,10]。在辽西褐土区,气候干旱和土壤紧实是限制该地区玉米产量的重要因素。由于常年旋耕,该区域耕层厚度平均仅有15 cm,耕层以下土壤紧实;加上降雨分布不均,春旱频发,干旱时土壤穿透阻力超过2 MPa,甚至会达到5 MPa,严重阻碍根系生长并降低作物产量^[2,11-12]。当地普遍通过深松耕来降低土壤容重和紧实度,有研究^[13]指出,与免耕的全实构造相比,深松创造虚实相间的耕层构造,有助于降低土壤紧实度,进而提高玉米产量;但是深松的增产效果在干旱年份降低。这些研究所谓的“免耕”仅是在收获至播种期间不进行耕作,并采用免耕播种机播种,忽略了免耕技术的关键环节——秸秆覆盖,导致土壤含水量低,有时会提高土壤容重和土壤紧实度。随着对保护性耕作(种植作物不需要翻土或耕作,并把残茬留在土壤表面让其自然分解的耕作方法)认识的深入,不少研究^[14]结果表明,由于秸秆覆盖和不扰动土壤,免耕能够显著提高土壤的蓄水保墒能力,减少土壤侵蚀,改善土壤结构,提高土壤肥力并降低温室气体排放。然而,在辽西地区,鲜有研究探讨长期旋耕转变为免耕后土壤含水量和容重变化对土壤穿透阻力的影响。也有研究^[7-8]探讨了不同类型土壤中容重和含水量对土壤穿透阻力的影响,并很好地通过土壤容重和含水量预测穿透阻力^[6,15],但这些工作大多集中在模拟或盆栽试验,或者仅仅关

注于含水量或容重单个因子变化对土壤紧实度的影响,忽略了全生长季耕作措施下干旱(含水量)和紧实(容重)同步变化对土壤穿透阻力的影响,难以回答耕作方式改变对土壤紧实度的影响及机理^[16-18]。

本研究通过田间试验定位监测,测定免耕、旋耕和深松耕作下不同层次土壤容重、含水量和穿透阻力的变化特征,建立基于含水量和容重的土壤穿透阻力模型,分析不同范围内容重和含水量对穿透阻力的影响,初步明确耕作技术转变对土壤紧实度的影响,为该区域保护性耕作的应用与推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于辽宁省北票市蒙古营镇蒙古营村($120^{\circ}51'E, 41^{\circ}54'N$),属于温带大陆性季风气候,全年日照时间2 933 h,年平均气温 8.7°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $3\ 540^{\circ}\text{C}$,其中5—9月为 $3\ 224^{\circ}\text{C}$,无霜期为150 d,年平均降水量480 mm,60%以上降雨集中在6,7,8月,常年等雨播种。试验期间(2017年5—10月)降雨量和日均温见图1。根据降水距平百分率划分,5,6,7月都属于干旱月份,尤其是5月,有效降雨量仅为13.4 mm,远低于常年平均40 mm,属于大旱。当地种植制度主要以玉米一年一作为主。试验地土壤为褐土,质地为砂质壤土,耕层有机质含量为 13.6 g/kg ,碱解氮、速效磷和有效钾含量分别为 $59.7, 32.4, 120.6\text{ mg/kg}$,pH 6.8,耕层土壤容重为 1.31 g/cm^3 。开始试验前,该地块已经连续30年以上旋耕。

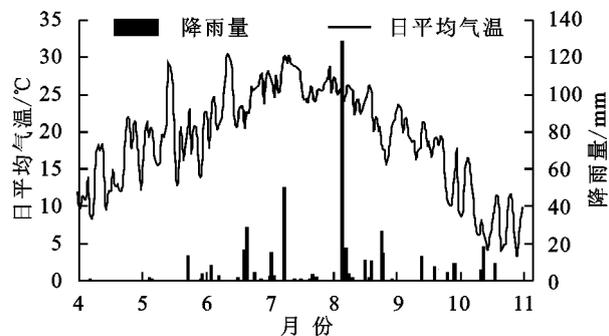


图1 试验期间日平均气温和降雨量

1.2 试验设计

试验开始于2016年。采用随机区组设计,设置免耕(no tillage, NT)、深松(subsoiling, SS)、旋耕(rotary tillage, RT)3个处理(表1)。其中,深松和旋耕处理为当地普遍采用的耕作方式。每个小区面积为 $100\text{ m}\times 9\text{ m}$ (900 m^2),3次重复。种植作物为

玉米,一年一熟,连作。供试品种为“联达169”,保苗密度为60 000株/hm²,行距为60 cm,株距为27 cm;5月23日播种,10月3日收获。底肥用量为N 156

kg/hm²,P₂O₅ 84 kg/hm²和K₂O 72 kg/hm²;在拔节期进行追肥,肥料用量为N 103.5 kg/hm²。数据采集于2017年5—10月。

表1 3种耕作方式的田间作业过程

代码	处理	操作方法
NT	免耕耕作	秋季收获后留茬30~40 cm,其余秸秆覆盖地表,春季采用2BMZF型免耕精量播种机直接播种
RT	旋耕耕作	当地传统耕作方式,秋季收获后秸秆全部清除离田,春季用旋耕机进行浅旋整地(深度约为15 cm),采用常规播种机播种
SS	深松耕作	深松处理,秋季收获后秸秆全部清除离田,然后利用耧式深松机进行全方位深松(深度为25~30 cm),春季旋耕后采用常规播种机播种

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤容重和含水量 为确保建立数据覆盖大部分田间土壤容重和含水量的情况,分别在不同时期和降雨的情况下采集土壤容重和含水量数据。采用土钻于5月20日、6月1日、6月20日、7月13日和9月20日在玉米株间采集0—15,15—30,30—45 cm土壤样品,用重量法测定土壤容重和含水量,3次重复。

1.3.2 土壤穿透阻力 在测定土壤容重和含水量的同时,采用SC-900硬度计在玉米株间采集0—45 cm土壤穿透阻力。土壤硬度计自动计录土层深度和穿透阻力,每间隔2.5 cm读取1个数值,5次重复。

1.3.3 土壤穿透阻力模型 采用da Silva等^[19]提出的模型拟合土壤穿透阻力,模型为:

$$PR = d\rho_b^e \times \theta^f \quad (1)$$

式中:PR为土壤穿透阻力(MPa); θ 为体积含水量(cm³/cm³); ρ_b 为容重(g/cm³); d 、 e 、 f 分别为拟合参数。

1.3.4 土壤穿透阻力对含水量和容重的敏感性 在土壤含水量0.1~0.3 cm³/cm³和土壤容重1.0~1.5 g/cm³范围内,分别以土壤容重和含水量为常数,对方程(1)求一阶导数,分析土壤穿透阻力对含水量和土壤容重的敏感性。

1.4 数据分析与统计

方差分析采用SPSS 20.0软件完成。耕作处理

之间的显著分析在0.05水平下进行,平均值比较采用最小显著差异法(least significant difference, LSD),土壤穿透阻力模型和参数敏感性用Sigmaplot 10.0软件进行拟合绘图。

2 结果与分析

2.1 耕作方式对土壤容重和含水量的影响

春玉米播种前3个处理的土壤容重相近,稳定在1.25~1.32 g/cm³。春玉米播种后至收获前3种耕作方式0—15,15—30,30—45 cm的土壤容重变化见表2。总体来看,各处理土壤容重随着土层深度的增加而增大,免耕与旋耕和深松间的差异主要表现在0—15,15—30 cm土层。

经过多次干湿交替过程后(图1),免耕处理0—15 cm的土壤容重基本保持稳定(1.31~1.36 g/cm³),旋耕和深松0—15 cm的土壤容重变化主要发生在播种后40天以内,分别从播种时的1.07,1.08 g/cm³增加到1.28,1.25 g/cm³,此后基本稳定。在15—30 cm,旋耕和免耕处理的土壤容重分别稳定在1.41~1.43,1.39~1.42 g/cm³,深松在播种后20天从1.25 g/cm³增加到1.35 g/cm³,变化幅度小于0—15 cm,此后稳定在1.40 g/cm³。在30—45 cm,3个处理的土壤容重无明显差异。

表2 不同耕作方式土壤容重的季节变化

单位:g/cm³

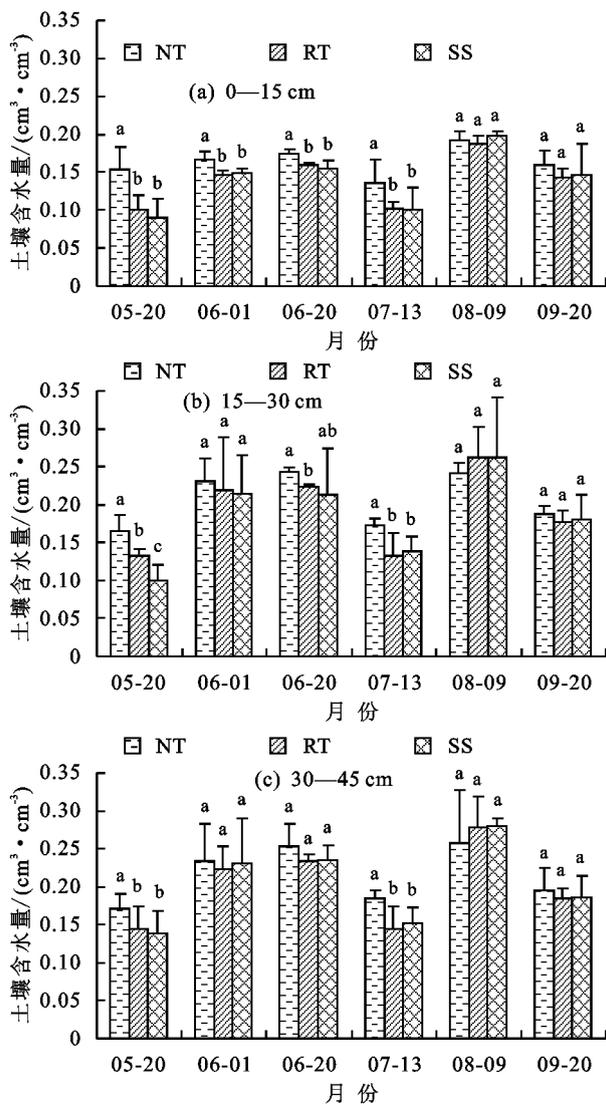
土层深度/cm	处理	5月20日	6月1日	6月20日	7月13日	8月9日	9月20日
0—15	NT	1.32a	1.31a	1.34a	1.31a	1.35a	1.36a
	RT	1.25a	1.07b	1.22ab	1.23ab	1.26a	1.28ab
	SS	1.28a	1.08b	1.18b	1.19b	1.28a	1.25b
15—30	NT	1.43a	1.39a	1.41a	1.40a	1.42a	1.42a
	RT	1.43a	1.41a	1.42a	1.42a	1.39a	1.43a
	SS	1.36a	1.25b	1.33a	1.36a	1.36a	1.40a
30—45	NT	1.45a	1.45a	1.42a	1.44a	1.45a	1.46a
	RT	1.48a	1.48a	1.45a	1.43a	1.45a	1.44a
	SS	1.46a	1.47a	1.45a	1.44a	1.43a	1.44a

注:同一时期同一土层不同字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。

本研究期间,各处理土壤含水量随着土层深度逐渐增大。播种前(5月20日)、开花期(7月13日)和

收获期(9月20日)含水量较低;苗期(6月1日)、拔节期(6月20日)和抽雄期(8月9日)含水量较高,这

与降雨的分布密切相关(图1)。在整个生长季,免耕的土壤含水量高于旋耕和深松(图2),尤其在播种前(5月20日)和开花期(7月13日)比较干旱时,免耕的含水量显著高于旋耕和深松。在0—15 cm,免耕播种前和开花期的含水量分别为0.15,0.14 cm³/cm³,此时旋耕的含水量分别为0.10,0.09 cm³/cm³,深松对应的含水量分别为0.10,0.10 cm³/cm³,免耕分别比旋耕和深松高50%和67%(图2a);在15—30,30—45 cm土层也表现出相似规律(图2b和图2c)。各处理土壤含水量的差异与降雨密切相关。在8月降雨量为120 mm(图1),在含水量最高的时期土壤处于近饱和状态(8月9日),各处理在3个土层的含水量无显著差异。



注:同一时期同一土层不同字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同耕作方式土壤含水量的季节变化

2.2 耕作方式对土壤穿透阻力的影响

短期免耕增加了表层土壤容重,同时提高了土壤含水量,在二者相互作用下土壤紧实度表现出复杂的变化规律。当容重较低时($< 1.3 \text{ g/cm}^3$),0—15 cm

土层不同含水量下土壤容重和穿透阻力表现出的规律一致:免耕的土壤穿透阻力显著大于旋耕和深松,分别平均高113%和167%(图3)。尽管如此,该层次免耕的土壤穿透阻力最大值仅为1.01 MPa(图3c),远低于影响根系生长的阈值2 MPa^[2]。当容重较大时($> 1.4 \text{ g/cm}^3$),15—30 cm的土壤容重和穿透阻力表现出的规律不一致:与深松相比,免耕在15—30 cm土壤容重较高,但二者穿透阻力相近,仅相差6%;与旋耕相比,二者土壤容重相近,免耕土壤穿透阻力小于旋耕,平均低20%。这种趋势在干旱时期尤其更明显,在7月13日(20天无降雨),15—30 cm土层免耕、旋耕和深松土壤穿透阻力分别为1.81,1.92,2.33 MPa,此时免耕的土壤容重比深松处理高18%,和旋耕相近,但免耕的土壤穿透阻力比旋耕和深松分别低6%和22%(图3c)。在30—45 cm土层,3个处理间的土壤穿透阻力无明显差异。因此,不同耕作方式下土壤容重和含水量在玉米生育期的变化趋势共同决定了土壤穿透阻力的变化特征。

2.3 土壤容重和含水量与土壤穿透阻力的关系

本研究期间,土壤容重和含水量的变化范围分别为 $1.07 \sim 1.48 \text{ g/cm}^3$ 和 $0.08 \sim 0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,基本覆盖大部分土壤的田间容重和含水量范围。为了探讨土壤容重和含水量对土壤穿透阻力的影响,利用公式(1)得到土壤穿透阻力与土壤容重和含水量的指数关系: $PR = 5.4795 \rho_b^{15.1757} \times \theta^{-2.3957}$,相关系数达到0.88(图4)。结果表明,随着土壤容重的增加,穿透阻力 $> 2 \text{ MPa}$ 的含水量逐渐增加。例如,当土壤容重 $> 1.3 \text{ g/cm}^3$ 、含水量 $< 0.08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,穿透阻力将 $> 2 \text{ MPa}$;当土壤容重 $> 1.4 \text{ g/cm}^3$ 、含水量 $< 0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,穿透阻力将 $> 2 \text{ MPa}$;当土壤容重 $> 1.5 \text{ g/cm}^3$ 、含水量 $< 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,穿透阻力将 $> 2 \text{ MPa}$ 。显然,对于较高容重的土壤,提高土壤含水量是降低土壤紧实度的关键。

参数敏感性有助于分析不同条件下土壤容重和含水量变化对穿透阻力的影响。由图5可知,在不同初始条件下,土壤容重和含水量对穿透阻力的影响程度不同。当土壤含水量 $> 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,穿透阻力对容重的敏感性大于含水量,但二者总体上对穿透阻力的影响较小,不到0.5 MPa。同样,当容重 $< 1.2 \text{ g/cm}^3$ 、含水量 $< 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,穿透阻力对含水量的敏感性大于土壤容重,但二者对土壤穿透阻力的影响也较小,不到0.8 MPa。然而,当土壤容重 $> 1.3 \text{ g/cm}^3$ 、含水量 $< 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,穿透阻力对含水量的敏感性显著大于对容重的敏感性,最高可达3倍。本研究中,3个处理在15—30 cm处的容重均 $> 1.3 \text{ g/cm}^3$,但免耕处理较高的土壤含水量显著降低了穿透阻力。

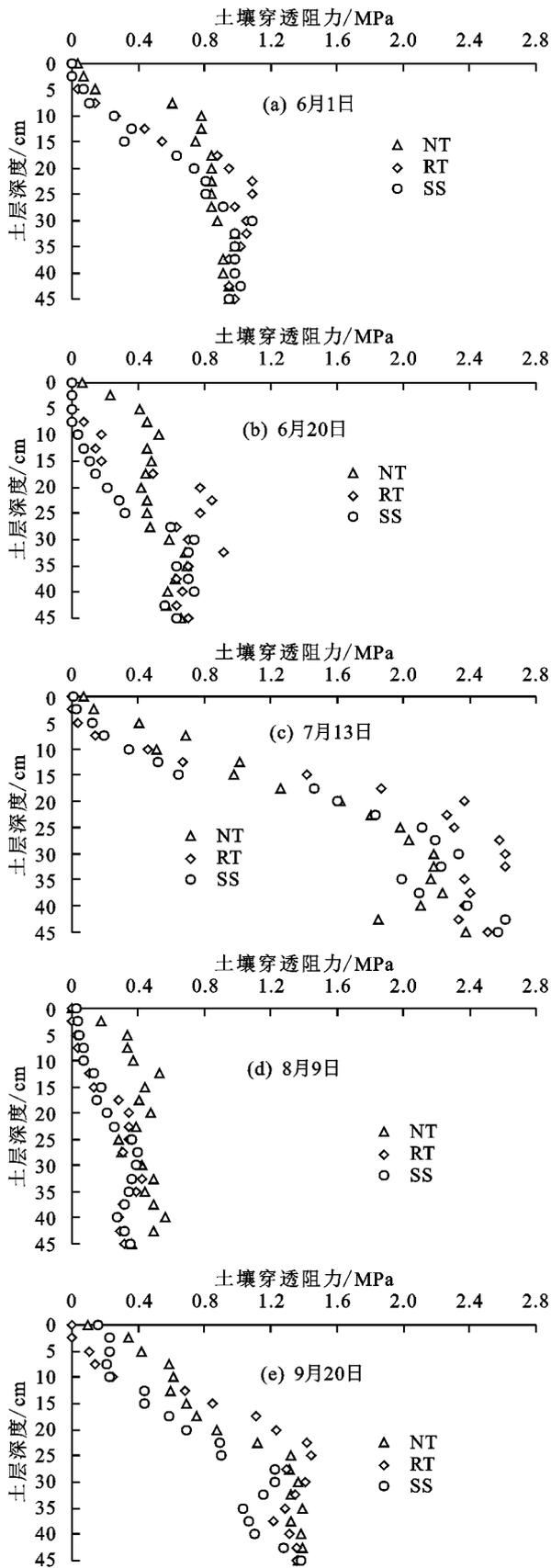


图3 不同耕作方式土壤穿透阻力的季节变化

3 讨论

3.1 耕作方式对土壤容重和含水量的影响

不同耕作方式对土壤的扰动强度和深度不同,直接导致土壤容重的差异。本研究中,旋耕和深松耕作

的深度分别约为 15, 30 cm, 土壤容重变化也集中在相应的层次。耕作后土壤容重增加的过程主要发生在几次降雨之后, 与前人的研究结果相似。如卢奕丽等^[20]研究表明, 耕作后 20 天内土壤容重逐渐增加, 20 天后基本稳定。主要原因是经过雨水冲击后土壤逐渐沉实; 同时, 干湿交替过程中土壤受到毛管作用而发生沉降^[21]。一般短期免耕条件下土壤容重大于旋耕和深松处理; 随着免耕年限的增长, 土壤有机质含量提高, 生物活动增强并逐渐形成良好的结构, 出现免耕与翻耕和旋耕处理土壤容重相近, 甚至变小的现象^[14, 22-23]。短期免耕的优势更多体现在土壤的保水作用。本研究中, 免耕处理下的秸秆覆盖显著提高了土壤含水量, 在干旱期尤其明显。众多研究^[13-14, 17, 24]证实, 在干旱和半干旱区域, 与翻耕和深松方式相比, 免耕显著提高土壤含水量; 一些仅采用免耕播种机播种、无秸秆覆盖的“免耕”处理, 其土壤含水量可能无显著变化, 有时甚至低于深松和翻耕处理。

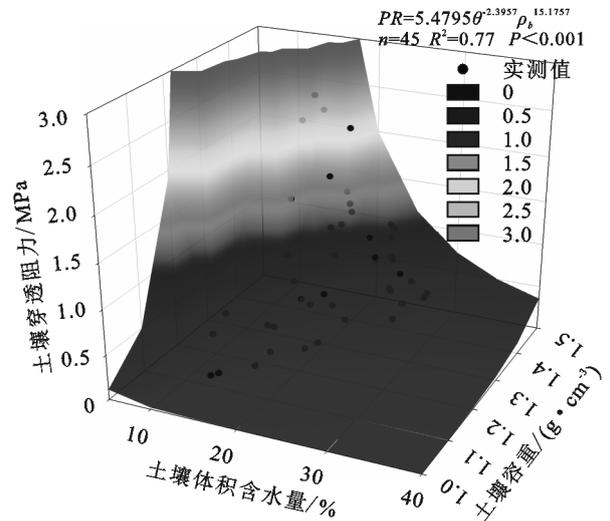


图4 土壤含水量和容重与土壤穿透阻力的关系

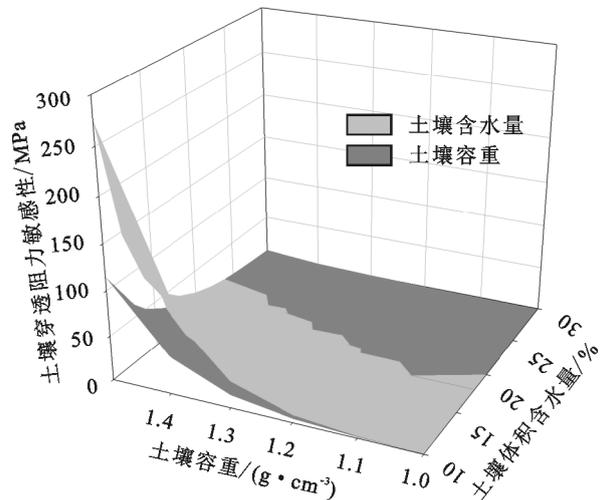


图5 土壤紧实度对土壤容重和含水量的敏感性

3.2 土壤容重和含水量与土壤穿透阻力的关系

土壤含水量和容重共同决定土壤穿透阻力。通

常情况下,在相同含水量时,随着土壤容重的增加,土壤穿透阻力增加;在相同土壤容重时,穿透阻力随着土壤含水量的增加而降低^[15]。很多研究利用土壤容重表示土壤紧实度,但本研究中土壤容重和穿透阻力的变化规律不同,说明在一定范围内土壤含水量对穿透阻力的影响大于土壤容重。在黏土上,土壤含水量高于 $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,颗粒间的黏结性更小,穿透阻力急剧下降,反之则急剧上升^[6]。本研究中,土壤含水量为 $0.18 \sim 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,穿透阻力急剧下降,并且随着容重的增大,急剧下降点的含水量逐渐升高,这可能与本研究的土壤质地和结构有关^[5-7]。在较高土壤容重时,含水量对穿透阻力的影响更大,尤其是在含水量低于 $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时。这个结果解释了免耕处理在 15—30 cm 处土壤穿透阻力小于深松和旋耕处理的现象。虽然有研究^[8]也探讨了土壤紧实度的动态变化特征,分析了紧实度的变化特征和含水量的关系,而且建立了特定土壤容重下穿透阻力和含水量的二次函数关系,但对黑土的研究^[25]表明,忽略了含水量的变化,土壤容重和穿透阻力之间的相关不显著。这些研究往往忽略了耕作措施影响下土壤容重和含水量均呈动态变化,关于耕作措施对紧实度影响的判断会产生偏差。另外,人们通常在收获时测定土壤穿透阻力^[26-27],此时由于长期干旱或降雨导致不同耕作方式下土壤含水量无显著差异(图 3d),容重最高的耕作方式其穿透阻力必然最大,得出免耕土壤紧实度最大,容易导致土壤紧实的结论。因此,有必要综合考虑作物生育期内土壤容重和含水量的动态变化对穿透阻力的影响。

3.3 耕作方式对土壤穿透阻力的影响

耕作方式通过影响土壤容重和含水量的动态变化影响土壤穿透阻力。本研究中免耕仅进行了 2 年,表现出该处理通过增加土壤含水量降低了穿透阻力。由于对免耕认识的差异,其他地区得到不太一致的结论。对鄂南红壤的研究^[26]表明,深松和旋耕处理土壤容重小于免耕处理,土壤含水量高于免耕处理,所以免耕的土壤穿透阻力显著高于深松和旋耕处理,干旱时超过 $2.0 \sim 2.5 \text{ MPa}$,直接限制作物地上和地下部分的生长,导致免耕处理产量最低。该研究与本研究的不同之处在于其“免耕”处理没有秸秆覆盖,未起到蓄水保墒的作用,免耕下较大的土壤容重和较低的含水量共同促进土壤穿透阻力的增加。在吉林黑土和辽西褐土上,无秸秆覆盖的“免耕”土壤穿透阻力也显著大于深松和旋耕。不少研究^[13-14,17,25]指出,在黏重或作业不当(如机械操作时土壤含水量较大)土壤

上,短期免耕有时会增加紧实度,但在长期免耕下土壤紧实度一般低于深松和旋耕处理,与长期免耕有助于形成良好的土壤结构有关。在褐土区,耕层土壤容重通常 $> 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$,犁底层可达到 $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 以上,而表层土壤含水量往往 $< 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ^[11-13],因此,该区域土壤水分不仅影响作物生长,而且在很大程度上影响土壤紧实度(往往大于土壤容重的影响),在干旱条件下,土壤含水量的微小变化可以导致土壤紧实度的巨大变化。虽然深松耕可以减小上层土壤容重,但当土壤逐渐沉实、下层土壤容重增加并出现干旱时,深松土壤的穿透阻力也可能达到或超过限制作物根系生长的阈值(2 MPa)^[2]。该区域需要特别注意土壤容重 $> 1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、含水量 $< 0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的田间情况,此时土壤穿透阻力将 $> 2 \text{ MPa}$,而且穿透阻力对水分的敏感性更大。因此,在改善土壤容重的同时,在此区域更应该注意保持土壤水分,才能更好地避免干旱加剧土壤紧实,并限制作物根系生长^[28]。

本研究指出,免耕具有短期保水效果,并在一定程度上降低了土壤紧实度。在 15—45 cm 土层,免耕土壤的穿透阻力平均值达到 1.92 MPa ,在长期被播种机碾压的区域,土壤容重可能大于穿透阻力的阈值^[29-30]。因此,可以通过短期免耕结合适当深松或覆盖作物实现提高土壤含水量的同时降低容重,随着土壤有机质含量增加,土壤结构不断改善,长期免耕有望最终解决土壤紧实对作物生长的不利影响^[31-32]。

4 结论

(1)短期免耕显著提高土壤含水量,但也增加土壤容重。与免耕处理相比,深松和旋耕处理减小了 0—15 cm 土壤容重,深松处理 15—30 cm 土壤容重仅在播种后 20 天左右小于免耕,此后趋于一致。免耕土壤含水量在大部分时期高于深松和旋耕处理。

(2)与深松和旋耕处理相比,免耕增加了表层土壤紧实度,但远小于限制根系生长的阈值,且降低了干旱时期下层土壤紧实度,避免了紧实胁迫;而干旱期深松和旋耕处理土壤紧实度则超过了限制根系生长的阈值。

(3)利用指数模型可以通过土壤容重和含水量很好地预测土壤紧实度的变化特征。当土壤容重 $> 1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 和含水量 $< 0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,作物很可能出现紧实度胁迫。在该区域大多数情况下,土壤穿透阻力对土壤含水量的敏感性大于对土壤容重的敏感性,干旱频发将加剧土壤紧实;应该首先考虑保持水分,在此基础上通过降低土壤容重来减小土壤紧实度。

参考文献:

- [1] Blair M M, Christopher E M, Judith M T, et al. Root-soil friction: Quantification provides evidence for measurable benefits for manipulation of root-tip traits[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2013, 36: 1085-1092.
- [2] Bengough A G, Mullins C E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses[J]. *Journal of Soil Science*, 1990, 41: 341-358.
- [3] Whitmore A P, Whalley W R, Bird N R A, et al. Estimating soil strength in the rooting zone of wheat[J]. *Plant and Soil*, 2011, 339: 363-375.
- [4] 杨世琦, 吴会军, 韩瑞芸, 等. 农田土壤紧实度研究进展[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 226-232.
- [5] To J, Kay B D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: The contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions[J]. *Geoderma*, 2005, 126: 261-276.
- [6] Carlos M P V, Juliana M M, Isabella C de M, et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content[J]. *Geoderma*, 2011, 166: 92-101.
- [7] Gao W, Watts C W, Ren T, et al. The effects of compaction and soil drying on penetrometer resistance[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 125: 14-22.
- [8] 罗敏, 邓才富, 陈家宙, 等. 鄂南红壤穿透阻力的时空变化研究[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 1055-1061.
- [9] Fu Y W, Tian Z C, Aziz A, et al. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 193: 114-121.
- [10] José D, Dorota D, Enrique F, et al. Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 125: 52-60.
- [11] 李嵩, 韩巍, 张凯, 等. 辽西褐土区高产土壤理化性质及影响玉米产量的主要因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2): 267-275.
- [12] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西地区土壤耕层及养分状况调查分析[J]. *土壤*, 2011, 43(5): 714-719.
- [13] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 81-90.
- [14] Humberto B C, Sabrina J R. No-tillage and soil physical environment[J]. *Geoderma*, 2018, 326: 164-200.
- [15] 张立彬. 土壤含水量和土壤紧实度对土壤圆锥指数值影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 1993, 9(2): 41-44.
- [16] 王金贵, 王益权, 徐海, 等. 农田土壤紧实度和容重空间变异性研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 594-598.
- [17] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 63-70.
- [18] Tania D B H, Brian K S, Rebecca T C, et al. Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186: 270-279.
- [19] da Silva A P, Kay B D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(3): 877-883.
- [20] 卢奕丽, 张猛, 刘晓娜, 等. 含水量和容重对旱地耕层土壤热导率的影响及预测[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 146-151.
- [21] Zhang M, Lu Y L, Heitman J L, et al. Temporal changes of soil water retention behavior as affected by wetting and drying following tillage[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1288-1295.
- [22] Wagner H M, Cássio A T, Douglas L K, et al. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 53-64.
- [23] Afzalnia S, Zabihi J. Soil compaction variation during corn growing season under conservation tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 137: 1-6.
- [24] 彭正凯, 李玲玲, 谢红军, 等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 214-221.
- [25] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 439-444.
- [26] He Y B, Lin L R, Chen J Z. Maize root morphology responses to soil penetration resistance related to tillage and drought in a clayey soil[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2017, 155: 1137-1149.
- [27] Juliano C C, Juan P A R, João P G R, 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.
- [28] Haytham M S, Constantino V, Miguel Á M, et al. Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield[J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 60-70.
- [29] 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 168-175.
- [30] Eric R L, Maximilian K. Above and below ground growth response of *Piceaabies* seedlings exposed to varying levels of soil relative bulk density[J]. *European Journal of Forest Research*, 2019, 138: 705-722.
- [31] Chen G H, Ray R W. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117: 17-27.
- [32] 赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2489-2503.