

# 鄂南红壤穿透阻力的时空变化研究<sup>①</sup>

罗 敏<sup>1,2</sup>, 邓才富<sup>1</sup>, 陈家宙<sup>2\*</sup>, 高冰可<sup>2</sup>, 高 跃<sup>2</sup>, 章文伟<sup>1</sup>

(1 重庆市药物种植研究所/中国医学科学院药用植物研究所重庆分所, 重庆 408435;

2 华中农业大学农业部长江中游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘 要:** 为进一步揭示红壤地区季节性干旱的致灾机制, 以夏玉米为供试作物, 研究鄂南地区季节性干旱过程中, 4 种耕作措施(深耕、常规耕作、免耕、压实)下, 红壤穿透阻力的时空变化特征及其对季节性干旱的响应特点。结果表明: 在轻度到中度干旱期间, 除深耕外, 其余 3 个耕作措施的耕层红壤穿透阻力均超过了作物根系适宜的最大阻力(2.0 MPa)。红壤穿透阻力在 0~40 cm 土层呈单峰形分布, 且不同耕作措施的峰值大小及峰值位置均存在差异; 同时, 随土壤含水量的增加, 阻力值减小, 且峰值位置在土层剖面亦随之发生不同程度的下移。红壤穿透阻力对季节性干旱有较好的响应关系, 与耕层土壤含水量的相关系数达 $-0.839(P<0.01)$ , 呈极显著非线性负相关关系, 以二项式拟合结果最优。该响应关系存在临界反应, 当季节性干旱达到一定程度时, 土壤含水量较小范围内的变化都将引起红壤穿透阻力的剧烈变化。因此, 在红壤地区研究季节性干旱时不可忽视土壤穿透阻力的存在, 必须考虑因土壤含水量降低而导致的高土壤阻力对作物的影响。

**关键词:** 红壤; 土壤穿透阻力; 季节性干旱

**中图分类号:** S152.9

我国亚热带红壤丘陵区分布广泛, 具有巨大的农业生产潜力, 在我国农业可持续发展战略中占有举足轻重的地位<sup>[1-2]</sup>。然而, 该地区常发生严重的季节性干旱, 农业生产受到极大影响。随着土壤干旱的发生, 土壤穿透阻力(即作物根系穿越土壤遇到的阻力)急剧增加<sup>[3]</sup>, 根系伸长受阻, 甚至停止<sup>[4]</sup>, 作物水分和养分吸收能力下降, 严重影响作物生长及产量形成。在干旱季节, 南方红壤下层(如 40~60 cm 以下)含水量并不低, 只是这些水分难以被作物吸收利用<sup>[5]</sup>; 而且由第四纪红色黏土发育的红壤黏粒含量较高<sup>[6]</sup>, 一旦含水量降低就变得十分坚硬。作为严重遭受季节性干旱影响的南方红壤, 其土壤穿透阻力具有怎样的变化特征? 红壤穿透阻力对季节性干旱过程有着怎样的响应? 这些问题均未见相关报道。本研究通过大田实测的方法, 研究红壤穿透阻力及其动态变化, 探讨红壤穿透阻力与季节性干旱的关系, 将有助于进一步掌握红壤季节性干旱的致灾机制, 为通过改善土壤阻力来缓解季节性干旱对南方红壤地区农业生产的影响提供科学依据和理论指导。

响提供科学依据和理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于 2012 年 6 月至 9 月在湖北省咸宁市华中农业大学红壤实验站内进行。该区年均气温为 16.9℃, 10℃的积温为 5 267℃, 年均降雨量为 1 455 mm, 平均蒸发量为 1 437 mm<sup>[7]</sup>。降水主要集中在春季和夏初, 其余时间降雨较少。本次试验期间平均气温为 27.4℃, 以短期干旱为主, 连续干旱最多天数达 11 天, 干旱等级划分为轻到中度干旱。2012 年月降雨量和月均气温见图 1, 数据由试验站内的 Watchdog Series 2000 小型气象站自动观测。

供试土壤为第四纪红色黏土发育而成的红壤, 土壤质地为黏土。耕层田间持水量为 320.0 g/kg, 苗期萎蔫含水量为 200.0 g/kg。

### 1.2 田间试验设计

该地区夏玉米的整个生育期包括季节性干旱时

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271240)、重庆市基础与前沿研究项目(cstc2016jcyjA0169)和重庆市基本科研业务费项目(2013cstc-jbky-01320)资助。

\* 通讯作者(jzchen@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 罗敏(1987—), 女, 四川雅安人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤与药用植物营养研究。E-mail: minmin285233623@163.com

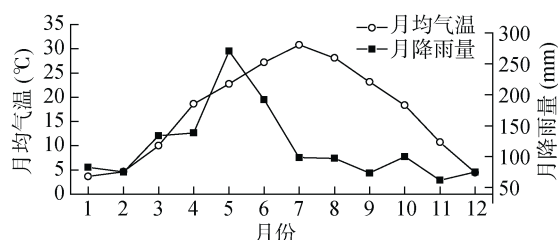


图 1 2012 年月降雨量和月均气温

Fig. 1 Monthly rainfall and average temperature in 2012

期,本试验以夏玉米作为供试作物进行小区种植。每个小区的面积为  $2.7\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 。设置 4 种不同的耕作处理,每个处理 3 次重复。耕作处理分别为:深耕(D),人工翻耕深度 30 cm,每年全面翻耕 2 次;常规耕作(C),人工翻耕深度 18 cm,每年全面翻耕 2 次;免耕(N),每年只进行一次播种,不翻耕;机械压实(P),采用 ZW 混泥土平板振荡器进行分层(分两层)压实,即先挖出 0~10 cm 土层土壤,然后翻挖 10~30 cm 土层,耙细,再整平后均匀浇水以便容易压实;待表面土壤稍干后用振荡器进行反复压实,压好后再将挖出的土翻入压实好的小区,同样耙细、铺平、浇水,再压实。压实后的土壤比原土壤表面低 10 cm 左右。

### 1.3 测定方法

土壤含水量与红壤穿透阻力同步测定,各生育期测定 1 次,连续干旱 10 天或遇下雨时加测。采用 SC900 土壤硬度仪测定 0~40 cm 土层土壤穿透阻力

(间隔 2.5 cm 一个阻力读数);土壤含水量用烘干法测定,0~40 cm 土层分 4 层进行取样。每处理小区 3 次重复。

### 1.4 数据处理

数据分析结合 Excel 2007 和 SPSS 13.0 软件进行,作图由 Origin 9.0 软件完成。其中,在回归分析前将土壤穿透阻力与土壤含水量分别进行峰归一化处理,公式为:  $y = x/x_{\max}$ , 其中  $y$  为转换后的值,  $x$  为实测值,  $x_{\max}$  为实测样本中最大值。土壤穿透阻力最大值为实测数据中的最大值 6.0 MPa,土壤含水量为饱和含水量 350.0 g/kg。

## 2 结果与分析

### 2.1 红壤穿透阻力的时间变化

由实测数据分析表明,在本次试验期间,不同耕作处理的土壤含水量具有明显的变化,整体呈先降低后增加的趋势。从图 2 可知,2012 年 7 月 3 日至 8 月 2 日土壤含水量逐渐降低,并在 8 月 2 日达最低点,即本试验的最干旱时期(称为干旱期);此后土壤含水量上升时出现明显波动,并在 9 月 14 日达到最高值,即本试验含水量最丰富时期(称为丰水期)。在整个生育期耕层含水量均值在各处理间的大小排序一致,为  $D > C > N > P$ ,其中干旱期各处理间差异明显,丰水期则无明显差异。

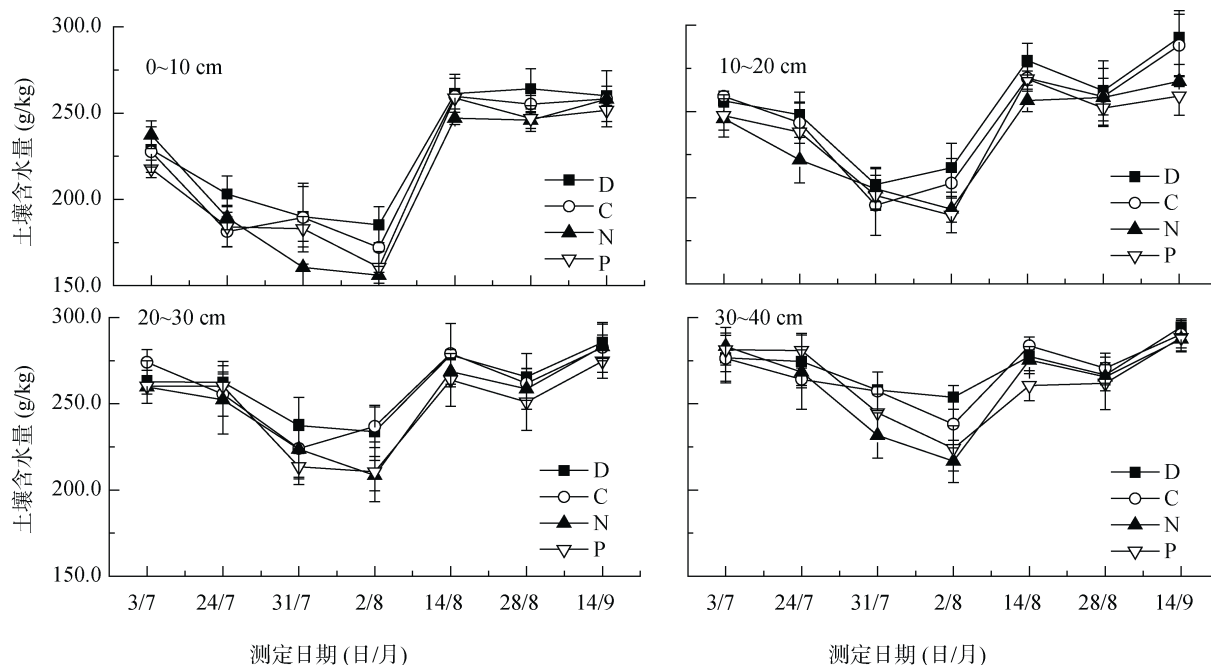


图 2 季节性干旱过程中土壤含水量的变化

Fig. 2 Changes of soil water contents during seasonal drought

本次季节性干旱期间,不同耕作措施耕层红壤穿透阻力的整体变化呈先增大后减小的趋势,并在 8 月 2 日达最大值,9 月 14 日达最小值(图 3)。整个观测期不同处理的红壤穿透阻力大小为  $P > N > C > D$ ,且耕层各处理间具有显著性差异( $P < 0.05$ ),

尤其在土壤含水量较低时期最为明显。进一步分析发现,0 ~ 10 cm 土层的显著性差异主要表现在 D 处理和 C 处理分别与 N、P 处理之间;10 ~ 20 cm 土层的显著性差异主要表现在 D 处理与 C、N 及 P 处理之间。

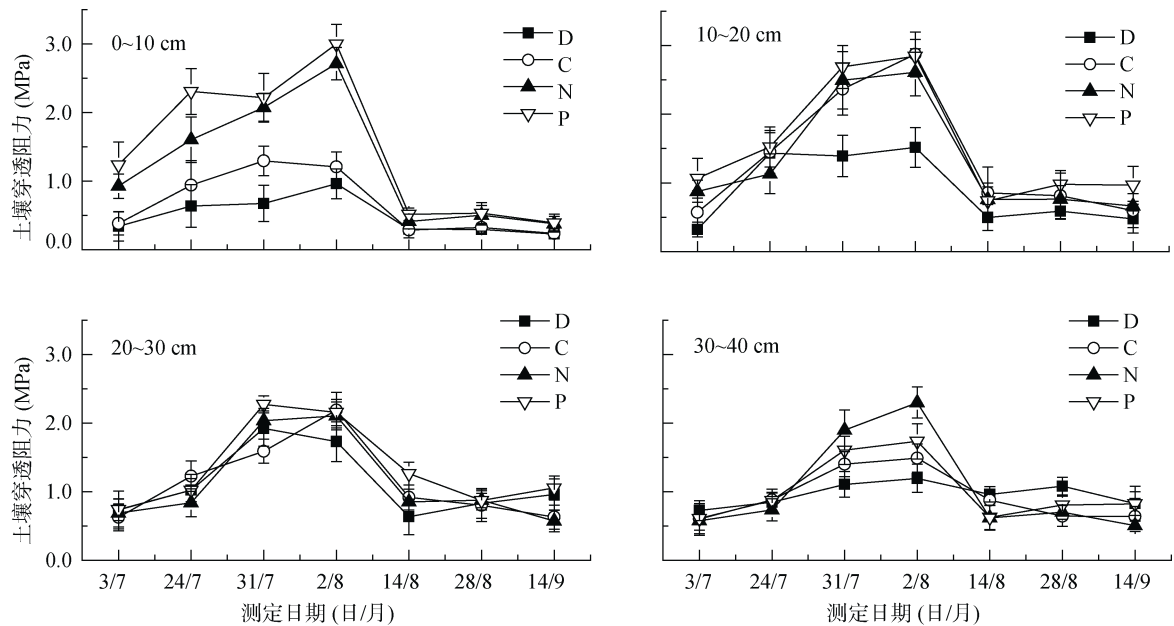


图 3 季节性干旱过程中红壤穿透阻力的变化

Fig. 3 Changes of soil penetration resistances during seasonal drought

2.2 红壤穿透阻力的土层垂直空间变化

图 4 和图 5 是本次季节性干旱观测期内相对土壤含水量最低(耕层土壤含水量 170.0 g/kg,干旱期)及最高(耕层土壤含水量 250.0 g/kg,丰水期)时,不同耕作措施下土壤含水量及红壤穿透阻力在土层剖面的变化情况。

干旱期各处理间土壤含水量差异较大,丰水期则

差异减小。由图 4 可知,在 0 ~ 40 cm 土层随着深度增加,土壤含水量呈递增趋势。干旱期,D 与 C 处理的土壤含水量显著高于 N 和 P 处理;其中,10 cm 处 D 处理分别比 N、P 处理高 18.8% 和 15.4%,C 处理分别比 N、P 高 10.3% 和 7.1%。D 与 C 处理之间含水量的差异随着土层深度增加而逐渐减小。丰水期,各耕作处理间差异较小,均不显著。

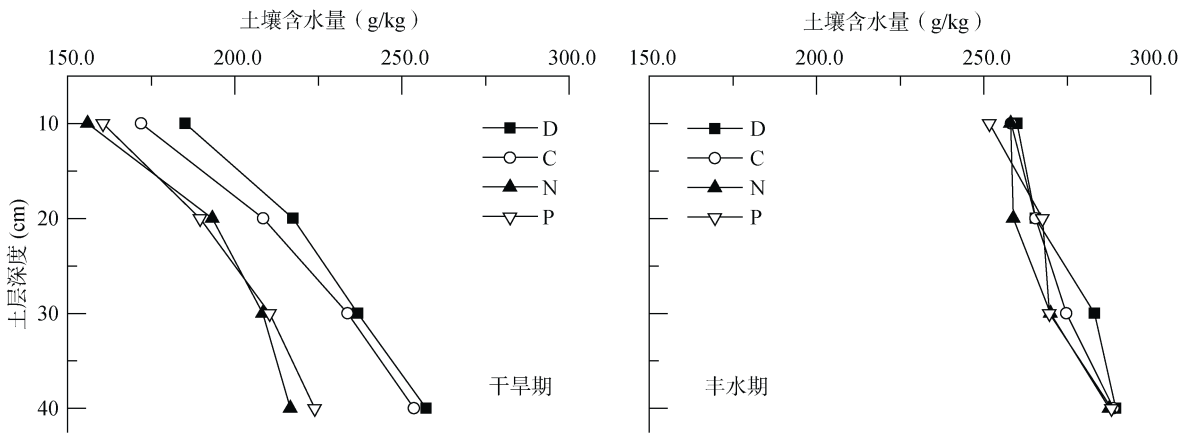


图 4 干旱期和丰水期土层剖面含水量

Fig. 4 Water contents of soil profiles in drought and wet periods

红壤穿透阻力在 0 ~ 40 cm 土层剖面随着土层深

度的增加则呈先增加后降低的变化趋势,并在约

20 cm 处的耕作犁底层阻力最大,这与土壤含水量在土层剖面的分布情况不同(图 5)。干旱期,处理间的阻力差异较大。D 和 C 处理的最大值分别出现在 25 cm 和 20 cm 左右土层,阻力为 1.8 MPa 和 3.0 MPa;而 N 和 P 处理的最大值出现在 10 cm 和 12.5 cm 左右土层,阻力为 2.7 MPa 和 3.3 MPa。随着土层深度的继续增加,各耕作处理的红壤穿透阻力逐渐降低。在 0~40 cm 土层深度范围内 D 处理的红壤阻力均低于 2.0 MPa,最大值接近 2.0 MPa,而 N 和 P 处理的红壤阻力在 5 cm 左右已急剧增大至接近 3.0 MPa。在 0~10 cm 土层 D、C、N 和 P 四个处理由最小值分别

增大至 1.1、1.3、2.7 和 3.0 MPa。同时 10 cm 处 D 处理比 N 和 P 处理分别低 58.5% 和 62.5%,C 处理比 N 和 P 处理分别低 51.1% 和 55.8%,而在 30 cm 处耕作措施间的差异则减小。由此可见,干旱期不仅红壤穿透阻力大,而且各处理间的差异也变大。丰水期,红壤穿透阻力明显减小。此时,各耕作措施的红壤穿透阻力的峰值位置均出现下移,并且 4 个耕作措施在 0~40 cm 土层剖面的阻力值均低于 2.0 MPa,处理间的差异也减小。其中,N 处理变化较小,在该土层剖面其红壤穿透阻力在 0.3~0.4 MPa 范围内波动,未出现明显的峰值。

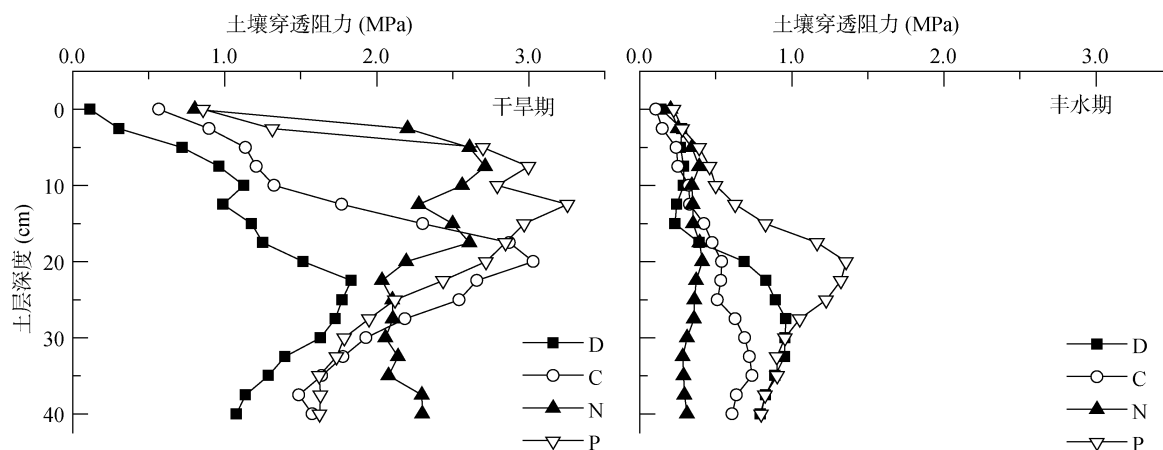


图 5 干旱期和丰水期红壤穿透阻力的剖面分布状况

Fig. 5 Profile distributions of soil penetration resistances in drought and wet periods

综上所述,红壤穿透阻力在 0~40 cm 土层剖面上随着土层深度的增加呈先增大后减小的趋势,即红壤穿透阻力在土层剖面的分布存在峰值现象。同时,峰值的位置因耕作措施的不同而存在差异,且随含水量增加峰值位置下移。并且,土壤含水量不同的时期,各处理间红壤穿透阻力的差异也不同。可见,田间土壤穿透阻力随土壤含水量波动剧烈,因此需要进一步研究土壤穿透阻力与含水量的关系。

### 2.3 红壤穿透阻力与土壤含水量的关系

将整个观测期内所测定的红壤穿透阻力与相对应的土壤含水量进行相关性分析,结果发现耕层红壤穿透阻力对土壤含水量有较好的响应关系,相关系数达 $-0.839(P<0.01)$ 。

由图 6 可以看出,随着土壤含水量的降低,红壤穿透阻力呈增加趋势,而当土壤含水量降低至某一值时,红壤穿透阻力增加幅度急剧增大。不同土层红壤穿透阻力与含水量关系出现不同的临界反应。在 0~10 cm 土层,土壤含水量为 250.0 g/kg 左右时红壤穿透阻力的变化出现差异。在含水量 $>250.0$  g/kg 时,随着土壤含水量的增加,红壤穿透阻力变化幅度较

小,并趋于稳定;在含水量 $<250.0$  g/kg 时,随着土壤含水量的持续减小,红壤穿透阻力急剧增加。10~20 cm 土层则在土壤含水量 300.0 g/kg 时发生临界反应。以上结果表明,红壤穿透阻力随土壤含水量的增加而剧烈递减,当含水量增加至一定量时,红壤穿透阻力变化幅度减缓,并趋于稳定;且发生转折时的含水量因土层不同而存在差异。

相关分析结果表明,在不同耕作措施下红壤穿透阻力与土壤含水量具有极显著的负相关关系( $P<0.01$ )。进一步将红壤穿透阻力与土壤含水量进行回归分析,得出二者具有较强的非线性相关性,最终以二项式拟合得到最优效果,即可用一元二次方程 $y=ax^2+bx+c$ 描述二者的关系,如表 1 所示。不同处理的拟合方程相关系数存在差异,但各处理的拟合度均较高,达极显著水平。在变化趋势上,各处理间红壤阻力随土壤含水量的变化较为一致,均是随着土壤含水量的增加而减小,并且存在转折点;当达到转折点后随着含水量的继续增大,红壤阻力减小且趋于平缓,无限接近于某一值。该转折点及稳定值因处理的不同而存在差异。

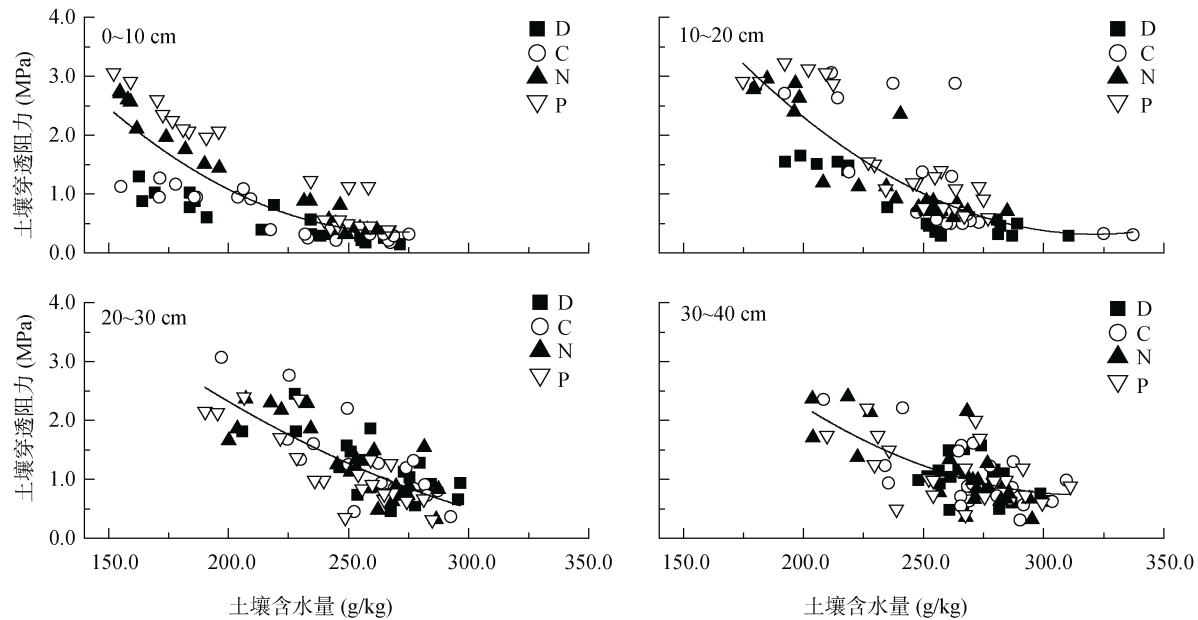


图 6 红壤穿透阻力与含水量的关系  
Fig. 6 Relationships between soil penetration resistance and water content

表 1 不同耕作措施下土壤穿透阻力  $y(\text{MPa})$  与土壤含水量  $x(\text{g/kg})$  的关系

Table 1 Regressions between soil penetration resistances and water contents under different tillage methods

处理	拟合方程	$n$	相关系数 $r$
D	$y=0.733x^2-1.399x+0.675$	21	0.927**
C	$y=0.977x^2-1.752x+0.811$	21	0.910**
N	$y=2.477x^2-4.193x+1.809$	21	0.989**
P	$y=2.031x^2-3.795x+1.784$	21	0.968**

3 讨论与结论

3.1 讨论

干旱是一个综合过程，会引起土壤一系列物理、化学和生物学性质变化。干旱过程中，土壤穿透阻力急剧增加，与干旱一起导致作物受灾，但二者同时增加，又难以区分其对作物的影响。土壤穿透阻力其实是一种独立的非生物胁迫<sup>[8]</sup>，对作物具有直接的影响<sup>[9-11]</sup>。早期即有土壤穿透阻力与土壤含水量关系的研究，甚至用土壤阻力来估算土壤含水量<sup>[12]</sup>。在土壤体积质量不变的情况下，毛管水张力随干旱而增加，土壤穿透阻力也相应增大。在含水量相同时，细毛管多的土壤其阻力较大，体积质量大的土壤其穿透阻力也大，土壤有机质含量和田间管理等对土壤穿透阻力亦具有影响<sup>[13]</sup>。Whalley 等<sup>[14]</sup>的研究说明，即使相同的干旱过程和水分含量，不同性质的土壤会表现出不同的穿透阻力，从而对作物造成影响。

我国南方红壤丘陵区，由于降雨时间分布不均，少降雨季节又与强蒸发、高温炎热季节相叠合使该地

区常发生季节性干旱，6—9 月发生季节性干旱的概率高达 60%，且危害程度自 20 世纪 60 年代以来在持续增加<sup>[15]</sup>。本试验区域夏秋季大气蒸发强，红壤干旱发展速度快，表土层容易干燥失水；而且红壤膨胀性差(黏土矿物多为高岭石和铁铝氧化物)，土壤剖面紧实，导致作物根系分布浅，不能利用深层的土壤水分，因此极易遭受干旱胁迫。2012 年是本地区最风调雨顺的一年，在试验期间虽只有阶段性的轻旱至中旱发生，但试验区域的夏玉米生长仍然遭受了严重的阻力胁迫。当土壤阻力达 1.0 MPa 时作物根系的伸长速度有变慢的趋势<sup>[4]</sup>，2.0 ~ 2.5 MPa 时已显著抑制作物根系的伸长<sup>[16]</sup>。在本次试验轻到中度干旱期间，红壤阻力大多超过了作物根系适宜的最大阻力。

本试验结果表明，红壤穿透阻力对季节性干旱过程具有强烈的响应，与土壤含水量具有极显著的负相关关系，随着含水量的降低，红壤穿透阻力增大。这之前研究者的结果相一致<sup>[17-18]</sup>。本研究亦得出红壤穿透阻力与土壤含水量具有极显著的非线性相关性，并且在本试验条件下以一元二次方程拟合达到最优效果。其中，更值得关注的是，红壤穿透阻力在随季节性干旱发生的过程中存在转折点。例如，在 0 ~ 10 cm 土层土壤含水量转折点大致为 250.0 g/kg。当含水量大于该转折点时，随着含水量的继续增大，红壤穿透阻力减小并趋于平缓，且越来越接近于某一值；而当含水量低于该转折点，随着土壤继续干旱，红壤穿透阻力将急剧增大；此时，土壤含水量较小范围内的变化即可引起红壤穿透阻力的剧烈变化。土壤

基质势从 $-0.01$  MPa 降至 $-1.5$  MPa 时,土壤阻力存在数量级上的增加<sup>[17]</sup>。可见,土壤穿透阻力存在于干旱的整个过程,并可以猜测在红壤地区阻力胁迫的发生早于干旱胁迫,从而导致作物更易遭受干旱的危害。

### 3.2 结论

红壤的季节性干旱伴随着较大的土壤穿透阻力,且红壤穿透阻力对季节性干旱的发生具有强烈的敏感性,随着土壤含水量降低,红壤穿透阻力显著增大;因此,在红壤地区研究季节性干旱成因和采取季节性干旱防御措施时不能忽略土壤穿透阻力的影响。本研究对进一步揭示红壤地区季节性干旱的致灾机制具有重要的指导意义,对于土壤穿透阻力在红壤地区季节性干旱过程中扮演着怎样的角色以及如何影响作物生长尚需更深入的研究。

### 参考文献:

- [1] 孙波,董元华,徐明岗,等. 加强红壤退化分区治理,促进东南红壤丘陵区现代高效生态农业发展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 204–209
- [2] 何园球,孙波. 红壤质量演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1–375
- [3] Whalley W R, Leeds-Harrison P B, Clark L J, et al. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils[J]. Soil & Tillage research, 2005, 84(1): 18–27
- [4] Passioura J B. Soil conditions and plant growth[J]. Plant Cell and Environment, 2002, 25(2): 311–318
- [5] 陈家宙,吕国安,王石,等. 红壤干旱过程中剖面水分特征与土层干旱指标[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 11–16
- [6] 李成亮,何园球,熊又升,等. 四种不同母质发育的红壤水分状况研究[J]. 土壤, 2004, 36(3): 310–317
- [7] 赵福年,张虹,陈家宙,等. 作物水分胁迫指数监测红壤农田短期干旱的分析[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 314–320
- [8] Bengough A G, McKenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 59–68
- [9] Whalley W R, Watts C W, Gregory A S, et al. The effect of soil strength on the yield of wheat[J]. Plant Soil, 2008, (306): 237–247
- [10] White R G, Kirkegaard J A. The distribution and abundance of wheat roots in a dense structured subsoil- implications for water uptake[J]. Plant Cell and Environment, 2010, (33):133–148
- [11] Whitmore A P, Whalley W R, Bird R A N, et al. Estimating soil strength in the rooting zone of wheat[J]. Plant Soil, 2011,(339): 363–375
- [12] Mielke L N, Powers W L, Badri S, et al. Estimating soil water content from soil strength[J]. Soil & Tillage research, 1994, (31): 199–209
- [13] Watts C W, Clark L J, Poulton P R, et al. The role of clay, organic carbon and cropping on plough draught measured on the Broadbalk Wheat Experiment at Rothamsted[J]. Soil Use and Management, 2006, (22): 334–341
- [14] Whalley W R, To J, Kay B D, et al. Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters[J]. Geoderma, 2007, 137(3/4): 370–377
- [15] 黄道友,彭延柏,陈桂秋,等. 亚热带红壤丘陵区季节性干旱成因及其发生规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 124–126
- [16] Whitmore A P, Whalley W R. Physical effects of soil drying on roots and crop growth[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(10): 2 845–2 857
- [17] Bengough A G. Modelling Rotting Depth and Soil Strength in a Drying Soil Profile[J]. Journal of theoretical biology, 1997, 186: 327–338
- [18] Ley G J, Mullins C E, Lal R. The potential restriction to root growth in structurally weak tropical soils[J]. Soil & Tillage research, 1995, 33: 133–142

## Temporal and Spatial Response of Red Soil Penetration Resistance in South Hubei

LUO Min<sup>1,2</sup>, DENG Caifu<sup>1</sup>, CHEN Jiazhou<sup>2\*</sup>, GAO Bingke<sup>2</sup>, GAO Yue<sup>2</sup>, ZHANG Wenwei<sup>1</sup>

(1 *Chongqing Institute of Medicinal Plant Cultivation & Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences, Chongqing 408435, China*; 2 *Ministry of Agriculture Key Laboratory of Arable Land Conservation of Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*)

**Abstract:** The spatiotemporal variation of soil penetration resistance (PR) and its response characteristics to seasonal drought were studied in order to reveal the disaster mechanism of seasonal drought. Combined with the determination of field and indoor, the spatiotemporal variations of PR were studied under four tillage measures, including deep tillage, conventional tillage, no-tillage and compaction for the summer maize. During the mild and moderate drought, the PR of three tillage measures surpassed the maximum resistance suitable for the root (2.0 MPa) except deep tillage. Soil PR showed unimodal distribution in 0–40 cm soil layer, and the size and position of the peaks were different among tillage measures. With the increase of soil water content, the size decreased and the position went down in soil layer. Soil PR had good response to seasonal drought. The correlation between soil PR and water content was non-linear and negative significantly, with the correlation coefficient of  $-0.839$  and binomial formula. There was a critical response, when seasonal drought reached a certain degree, the violent change of soil PR was caused by water content changed finely. Soil PR was an unneglectable factor in seasonal drought, and the effect of high penetration resistance due to lowered water content on crops must be considered.

**Key words:** Red soil; Soil penetration resistance (PR); Seasonal drought