

土壤紧实胁迫与植物抗胁迫响应机理研究进展

邹养军, 马锋旺*, 韩明玉, 吴亚维

(西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 植物正常生长发育需要适宜的土壤容重, 当容重偏高时会改变土壤物理、化学和生物性状, 发生土壤紧实胁迫, 影响土壤养分有效性, 造成多数土壤酶活性、土壤生物数量降低, 使植物生长发育受阻, 生物产量降低。目前土壤紧实胁迫是制约我国农业可持续发展的因素之一, 本文综述了土壤容重与土壤理化性质和土壤生物的关系、以及植物对土壤紧实胁迫的响应机理研究进展, 并在此基础上展望了土壤紧实胁迫的进一步研究方向。

关键词: 土壤紧实度; 土壤容重; 研究现状

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)06-0212-04

土壤是植物生长的载体, 供给植物生长所需的水分和养分。植物正常生长不仅需要适宜的水肥, 还必须要有合适的土壤松紧度, 土壤过紧, 会造成植株生长发育不良, 严重时可降低产量的 10~30%^[1,2]。土壤紧实、容重偏高是目前影响我国农业丰产优质的主要因素之一, 目前我国农田土壤紧实度偏高的原因是多方面的, 主要有单一或不合理的耕作制度, 长期的土壤干旱, 大型农业机械的碾压以及土壤质地本身的原因等^[3~7]。土壤紧实度 (soil compaction) 是指土壤对机械应力所表现出的特性, 可通过测定土壤容重、孔隙度和机械阻力来进行评价, 而土壤容重 (soil bulk density) 是土壤紧实度最直接的测量办法, 同时也是衡量土壤质量的一个重要指标, 土壤容重和土壤紧实度直接相关, 土壤容重提高, 土壤紧实度也增大。故土壤紧实胁迫, 也可以理解为高容重土壤胁迫, 当土壤容重发生变化, 不仅表现出土壤有效水分、导热率、气体比例等物理性状发生变化, 同时对作物生长发育产生不同的影响, 最终影响作物的产量形成^[8], 一般认为土壤容重不适合使作物减产, 只有在一定范围内土壤容重才有利于作物高产^[9]。本文从容重对土壤理化性质和土壤生物的影响、植物对土壤紧实胁迫的反应等方面进行了综述, 并提出土壤紧实胁迫的进一步研究方向。

1 土壤容重与土壤理化性质和土壤生物的关系

1.1 土壤物理性质

适宜作物生长理想的土壤结构固、液、气三相比应为 5:3:2, 增大土壤容重, 会造成土壤结构发生变

化, 使土壤孔隙度逐渐减少, 团聚体互相靠近, 土壤中的水分含量与空气的比例发生变化, 并影响到土壤的热容量, 同时使气体扩散率降低, 土壤趋于厌氧环境。多数观测表明当土壤中充气孔隙小于 10% 时, 就对作物生长发育造成不利影响。在土壤被严重压实时, 土壤通气孔隙度为 3% 以下, 团聚体相互靠近并发生磨擦, 稳定性明显降低, 植物根系生长环境的机械阻力增大^[10]。张兴义等^[11]研究发现, 黑土农田春小麦地的心土层机械阻力高达 2 MPa, 耕层耕翻前后的机械阻力分别为 0.5 MPa 和 0.2 MPa。Tobias S^[12]发现地面较高的机械载重, 造成心土层 60~70 cm 处发生形变。土壤被压实后, 土壤紧实度和机械阻力明显增加, 致使作物根系下扎受阻。

1.2 土壤化学性质

Neve S 等^[13]发现当土壤容重大于 1.6 g/cm³ 时, 碳的矿化和氮的硝化作用被较强的抑制, 压实 3 周后硝态氮较未压实的降低 8%~16%, 碳氮比增高, 土壤质量降低。Bakken L R^[14]对测定 75 d 中反硝化释放的氮在压实土壤 15~20 kg/hm² 和未压实土壤 3~5 kg/hm² 进行比较, 发现前者 N₂O 散发量增加。Atwell B J^[15]测定沙壤土小麦根区速效 N、P、K 含量, 发现播种后 33~62 d, 压实土壤根区的速效 N、K 较未压实的低 12%~14%。

土壤紧实不仅影响土壤养分的有效性, 对于主要土壤酶也有重要影响。张国红等^[16]研究认为疏松区 (容重 1.30 g/cm³) 的土壤转化酶、多酚氧化酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性明显高于 CK (自然状态土壤, 容重 1.44 g/cm³) 和紧实区 (容重 1.60

收稿日期: 2007-02-15

基金项目: 西北农林科技大学拔尖人才支持计划; 农业部 948 项目 (2006-G28)

作者简介: 邹养军 (1969-), 男, 陕西乾县人, 助理研究员, 博士, 主要从事果树生理生态研究。

* 通讯作者: 马锋旺。

g/cm^3),CK 又高于紧实区;土壤紧实度对脲酶和中性磷酸酶活性影响较小;过氧化氢酶活性则是紧实区 $>$ CK $>$ 疏松区;土壤三种磷酸酶中的碱性磷酸酶和酸性磷酸酶活性较高,中性磷酸酶活性较小。土壤紧实度不同对多种土壤酶的活性有不同程度的影响,土壤疏松有利于提高转化酶、多酚氧化酶、酸性和碱性磷酸酶活性,而对过氧化氢酶土壤疏松有降低酶活性的作用。

1.3 土壤生物

由于土壤容重过大导致土壤物理化学性状恶化,进而影响了土壤生物类群数量和活性。主要表现在土壤微生物、土壤动物特别是蚯蚓数量减少,土壤微生物活动和根瘤菌固氮活性降低。Kaiser E A^[17]研究表明由于大孔隙减少,小孔隙被水所封闭,空气交换受阻,微生物生物量降低 7%,跳虫数量减少 65%。Sochtig W 等^[18]研究压实对土壤中蚯蚓洞穴数量的影响,发现土壤孔隙度在 37.5%、42.5%时的洞穴数量是土壤孔隙度 47.5%、56%时的 1/2。Santruckova 在德国的砂壤土上研究压实对土壤微生物活性的影响,发现微生物总生物量降低了 37.7%,压实土壤最大微生物量出现在 20~30 cm,而不是顶层。当空气孔隙度小于 8%时无真菌生长,在 8%~27%时真菌生长受一定影响^[10]。土壤生物是土壤的重要组成部分,对土壤结构、土壤肥力形成以及植物营养转化中起着积极的作用,是植物正常生长不可缺少的因子,土壤容重变化对土壤生物的效应必然累加到植物体上,进而影响植物的正常生长。

2 土壤容重对植物生长的影响

2.1 对根系生长的影响

土壤容重以机械阻力形式影响植物的生长,土壤机械阻力对植物生长的影响,首先表现在对根系生长的影响,土壤机械阻力对根系生长影响的研究结果较为一致,即在紧实土壤中根伸长速度减慢,根系变短粗。

根系在土壤中所遇到的机械阻力是影响其生长的最主要的物理因子之一,土壤结构决定了整个植物根系生长的根区所会遇到的机械阻力大小,目前多数人认为根系生长所遇到的机械阻力是普遍存在的。适当紧实的土壤能增加根和土的密接度,提高根系对肥水的利用率。但土壤过于紧实,一方面有效持水量降低,同时因土壤机械阻力过大,根系生长受阻,不能在土体中均匀分布,这对根吸收土壤中的水肥很不利。已有的研究报道指出,稻、麦等作物的

适宜容重是 $1.2\sim 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ ^[19]。

2.2 对地上部生长的影响

土壤容重对植物地上部分生长影响有不同的研究结果。多数研究认为土壤高容重会抑制地上部枝叶生长,造成单叶叶面积减小和叶片厚度变薄,直接影响光合产物的积累,降低了地上部生物量^[15,20,21],但也有人认为土壤高容重对地上部生长影响不明显^[22]或无影响^[23],造成这些不同结果的原因与植物种类有关,同时可能和土壤水分的差异有关。许多研究者认为,容重对植物的影响是间接的,是通过改变土壤的水肥气热状况起作用的。但一些报道显示,机械阻力并未引起叶水势的变化^[24,25],因此不能用紧实土壤影响植株水分状况来解释土壤机械阻力对地上部生长的影响。Young 等^[24]在改变培养基质砂的容重而肥水气充分供应的实验中观察到,小麦和大麦在根系受到机械阻力 10 min 后叶片伸长速度降到最低值,这充分说明机械阻力对叶片生长有直接影响。

2.3 对根冠比的影响

土壤容重对根冠比的影响,有不一致的结果,有报道认为容重对根冠比影响不明显或增大。刘晚苟等^[26]分析认为造成这些差异可能是各研究中土壤水分状况不一致的结果,并认为只有在低土壤水势下容重才对玉米的根冠比产生影响,而高土壤含水量下影响不明显。宋家祥等在棉花上试验认为,不同土壤容重与棉花生物学产量呈明显的抛物线关系,土壤容重为 $1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$ 左右时,生物学产量最高,当容重在此临界值以下时,生物学产量随容重加大而增加,而根干重随容重增加而下降,这种反向变化,导致了冠/根比随容重增大而提高,而当容重在临界值以上时,生物学产量与根干重随容重增加而同步下降,冠/根比仍呈线性增加,这表明当容重增加时,对根生长的抑制作用大于地上部^[19]。

3 植物对土壤紧实胁迫的响应机理

3.1 土壤紧实胁迫植株的补偿生长与信号感知

通过混合土壤容重的实验发现,处在高容重部位的根系生长变粗变短,生物量显著降低,而生长在低容重部位根系的生长量增大,说明植物根系具有对土壤容重变化的反应能力,同时存在补偿生长。Iijima 等^[27]研究认为,当下层土壤容重过大抑制根系向下生长时,会刺激上层侧根的发生,表现为根系在不同土层生长具有一定的补偿作用,但这种补偿作用是有限的,低容重土壤根系的增生不足以弥补高容重土壤根系所受到的影响。Stypa^[28]研究认

为,干旱使混合容重处理根系的生长侧重于低容重一边,存在补偿效应。分析原因可能是:低容重土壤中的根受到的阻力小,生长快,高容重土壤中的根受到的阻力大,生长慢,在用于根系形态建成的光合产物一定条件下,分配给受阻力小部分根的量增加了。混合容重土壤中的根系的这种补偿效应说明了根系对非均匀容重土壤的适应。Hussain 等^[29]报道西红柿在混合容重 $1.1\sim 1.5\text{ g/cm}^3$ 土壤中的生长速度与在单一容重 1.1 g/cm^3 中的速度一样。刘晚苟等^[3]在玉米上得到相似结果,即无论是在土壤干旱还是湿润条件下,玉米在混合容重土壤中的生长速度与在 1.2 g/cm^3 中的一样。

目前还不清楚植物对土壤容重空间变化感知差异的原因,但一点比较肯定,就是对土壤紧实的感知不是通过水信号传递的,因为生长在高紧实度土壤中的植株叶水势和叶细胞膨压与生长在低紧实度土壤中的没有差别,但气孔导度下降,植株生长受到抑制。有报道显示根系内源激素可能参与这种反应,多数人认为可能是根系在穿插土壤时受机械阻力后产生了大量的信号传递物 ABA,经木质部运输到地上部,进而调控植株对土壤紧实胁迫做出反应^[7,26]。

处在高容重土壤中的根系感知土壤机械阻力,将信号传到地上部,调控气孔导度,增强植物抗逆能力,提高作物水分利用效率。处在高容重土壤中的根系由于生长受到限制,一方面可能会促进处在低容重土壤中根系的生长,向土壤深层发展,发掘深层土壤水分,另一方面水分被作物消耗较慢而作为土壤水分暂存库,随时通过水平渗透方式向低容重土壤中缓释水分,这样可以防止土壤水分消耗过快,从而达到重新分配土壤供给作物水分的目的。

3.2 土壤紧实胁迫下植物的生理变化

3.2.1 根系的吸收能力土壤容重从两方面影响根系吸收水分和营养元素的能力,一方面高容重使根土接触紧密,促进更多水分和营养元素进入根生长区,从而提高了单根的吸收能力;另一方面则由于高容重会降低总根量,以至总的吸收量还是减少了^[30]。根系吸水能力的大小取决于根系水力导度,高容重土壤会降低根系导水率,在相同土壤基质势下,土壤容重提高,土壤机械阻力增大,高机械阻力使根的直径变粗,而根直径与根系导水率呈负相关关系,因此认为容重以机械阻力的形式影响根直径的大小,继而影响根的导水率^[31]。Childyal 认为,容重从 1.0 g/cm^3 增至 1.6 g/cm^3 时,土壤养分扩散系数不断增加,适当增加土壤紧实度,能增加单位

土体内有效持水量,而土壤养分向根际移动,不论是通过扩散还是质流,都是土壤含水量的函数^[32],所以适当紧实的土壤能增加根和土的密接度,提高根系对肥水的利用率。孙艳等^[7]在黄瓜上研究发现,随土壤紧实度的增加,土壤中的孔隙变小,板结程度提高,土壤中的氧气浓度降低,根系的呼吸受到抑制,黄瓜根系活力显著下降,认为根系活力的下降导致了根系吸收能力的降低。

3.2.2 植株生理生化特性 土壤紧实度通过调控植物叶片生理生化特性而影响其生长发育。当土壤紧实度增加时,叶片气孔导度(G_s)、蒸腾速率(E)、净光合速率(P_n)、可溶性糖含量、水分利用效率及比叶重均降低,但游离氨基酸含量和胞间 CO_2 浓度(C_i)则升高^[7]。

当土壤紧实度增加到一定程度时,细胞质膜受到一定程度的伤害,电解质的渗漏量和 MDA 的累积量增加,可溶性蛋白质的含量减少,同时 SOD、POD 和 CAT 酶活性升高,说明植物对土壤紧实胁迫伤害具有一定的修复能力,但虽然 SOD、POD 和 CAT 活性提高,细胞膜还是受到了一定程度的伤害,分析原因可能是活性氧的产生量超过了 3 种酶(尤其是 SOD)活性提高的幅度^[7,26]。

4 土壤紧实胁迫进一步研究方向

1) 加强土壤紧实胁迫与土壤微域环境变化的研究。土壤紧实状况变化会引起土壤理化性质的变化,进而引起土壤微域温度、水分、土壤微生物和酶类的变化,土壤微域环境变化与植株体生理生化变化机理尚待深入研究。

2) 加强植物抵抗土壤紧实胁迫的遗传基础研究。在研究植物土壤紧实胁迫过程中,人们发现同样紧实度下,不同品种的抗胁迫能力不同,说明遗传基础与植物的抗土壤紧实胁迫有密切关系,若能培育出抗土壤紧实胁迫的品种无疑对生产有重要意义,但迄今尚未见到植物抗机械阻力遗传学基础的研究报道。

3) 加强植物对自然紧实土壤反应机制的研究。以往研究土壤紧实胁迫对植物生长的影响多用人工压实的土壤,人工压实的土壤与自然土壤特性有很大差别,人工压实土壤的整体紧实度空间差异很小,而田间土壤各处之间紧实度不一致。在自然土壤中,当一部分根系处在较高紧实度土壤中时,另一部分根可能正处在紧实度较低的土壤中。用人工压紧的土壤作实验,其后果不是掩盖植物对土壤的某些反应,就是夸张了某些反应,因此加强植物对自然紧

实土壤反应机制的研究十分必要。

4) 加强果树土壤紧实胁迫的研究。土壤太松或太紧对植物生长都不利已为人们所共知,关于土壤紧实胁迫对植物生长与发育的影响已在水稻、玉米、小麦、棉花、黄瓜和番茄等一年生作物上有比较深入的研究,但在果树方面的研究报道很少。果树作为多年生深根性作物,根系分布深远,加之果园人工和机械活动频繁,极易发生土壤紧实胁迫,目前大多数果园不同程度存在土壤紧实胁迫的现实问题,影响着果实产量和品质,因此有必要进行果树土壤紧实胁迫的系统研究。

参 考 文 献:

[1] 贺明荣,王振林.土壤紧实度变化对小麦籽粒产量和品质的影响[J].西北植物学报,2004,24(4):649—650.

[2] Steniter E, Murer E. Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by SIMWASER model[J]. Soil and Tillage Research, 2003,73,43—56.

[3] 刘晚苟,山 仑.不同土壤水分条件下容重对玉米生长的影响[J].应用生态学报,2003,14(11):1906—1910.

[4] 黄细喜.土壤紧实度及层次对小麦生长的影响[J].土壤学报,1988,25(1):59—65.

[5] 南志标,赵红洋,聂 斌.黄土高原土壤紧实度对蚕豆生长的影响[J].应用生态学报,2002,13(8):935—93.

[6] 宋家祥,刘世平,沈新平,等.土壤紧实度对棉花吸肥的影响[J].江苏农学院学报,1997,18(3):21—26.

[7] 孙 艳,王益权,杨 梅,等.土壤紧实胁迫对黄瓜根系活力和叶片光合作用的影响[J].植物生理与分子生物学报,2005,31(5):545—550.

[8] Ishaq M, Hassana, Saeed M. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. I. Soil physical properties and crop yield[J]. Soil and Tillage, 2001,59(1—2):57—65.

[9] 宋家祥,刘世平,马 刚,等.土壤紧实度对棉花产量的影响[J].江苏农学院学报,1997,18(2):7—11.

[10] 张兴义,隋跃宇.土壤压实对农作物影响概述[J].农业机械学报,2005,36(10):161—164.

[11] 张兴义,隋跃宇.农田黑土机械压实及其对作物产量的影响[J].农机化研究,2002,(4):64—67.

[12] Tobias S. Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels[J]. Soil use manage Oxon, UK: CABI International, 2001,17(4):229—234.

[13] Neve S, Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000,30(5—6):544—549.

[14] Bakken L R, Borresen T, Njos A. Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification and yield of wheat[J]. Journal of Soil Science, UK, 1987,38(3):541—552.

[15] Atwell B J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering. I. growth, development and root structure[J]. New

Phytologist, 1990,115(1):29—35.

[16] 张国红,张振贤,黄延楠,等.土壤紧实程度对其某些相关理化性状和土壤酶活性的影响[J].土壤通报,2006,37(6):1094—1097.

[17] Kaiser E A, Heisler C, Walenzik G, et al. The effect of mechanical soil compaction on microbial biomass development, Collembolan fauna, denitrification and mineralization in an agricultural location[J]. Einflusse von mechanischen Bodenbelastungen auf mikrobielle Biomasseentwicklung, 1991,66(1):531—534.

[18] Sochtig W, Larink O. Effect of soil compaction on activity and biomass of endogeic lumbricids in arable soils. Soil-Biol-Biochem[J]. 1992,24(12):1595—1599.

[19] 宋家祥,庄恒扬,陈后庆,等.不同土壤紧实度对棉花根系生长的影响[J].作物学报,1997,23(6):719—726.

[20] Buttery BR, Tan CC, Drury CF, et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and modulation of soybean and common bean[J]. Can. J. Plant Sci. 1998,78:571—576.

[21] 沈 彦,张克斌,边 振,等.人工封育区土壤紧实度对植被特征的影响[J].水土保持研究,2007,14(6):81—84.

[22] Goodman AM, Ennos AR. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize[J]. Ann. Bot. 1999,83:293—302.

[23] Oussible M, Crookston RK, Larson WE. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat[J]. Agron. J. 1992,84:34—38.

[24] Young I M, Montagu K, Conboy J et al. Mechanical impedance of root growth directly reduces leaf elongation rates of cereals[J]. New Phytol, 1997,135:613—619.

[25] Bengough AG, Young IM. Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances[J]. Plant and Soil, 1993,149:129—139.

[26] 刘晚苟,山 仑,邓西平.植物对土壤紧实度的反应[J].植物生理学通讯,2001,37(3):254—260.

[27] Iijima M, Kono Y, Yamauchi A, et al. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems[J]. Environmental and Experimental Botany, 1991,31(3):333—342.

[28] Stypa M, Nunez-Barrios A, Barry DA, et al. Effects of subsoil bulk density, nutrient availability and soil moisture on root growth in the field[J]. Soil Science, 1987,67:39—308.

[29] Hussain A, Black CR, Taylor IB, et al. Soil compaction: A role for ethylene in regulating leaf expansion and shoot growth in tomato[J]. Plant Physiol, 1999,121:1227—1237.

[30] Arvidsson J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction[J]. Plant Soil, 1999,208:9—19.

[31] 刘晚苟,山 仑,邓西平.干湿条件下土壤容重对玉米根系导水率的影响[J].土壤学报,2003,40(5):779—782.

[32] 宋家祥,刘世平,沈新平,等.土壤紧实度对棉花吸肥的影响[J].江苏农学院学报,1997,18(3):21—26.

Analysis based on RS & GIS of the effect of land-use/cover change on vegetation carbon reserves in arid region

—A case study on oases of Shanshan, Xinjiang

ZHOU Xu¹, LIU Zhi-hui^{1,2,3}, DAI Wei¹, JU Chun-yan¹, YI Li¹, JIANG Hong¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Xinjiang 510275;

2. International Center for Desert Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi, Xinjiang 830046;

3. Key Laboratory of Oasis Ecology of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: Land use/cover changes have been an important effect on carbon cycle. In this paper, we used multitemporal Landsat TM/SPOT⁴(P) merge data and SPOT⁵(XS/XI) data to compute the extent of different land cover types and mutual transformation one another in oases plain. The land-cover maps were made by the hybrid classification (method of combining unsupervised classification and supervised classification), and then the changes were detected. Carbon storages were assessed by using the results of multi-temporal Landsat TM/SPOT⁴(P) merge data and SPOT⁵(XS/XI) data and the published data about carbon storage in vegetation. Results indicate that the change rates of woodland area increased +4.5% per year from 1990~1999. Whereas, it decreased -1.7% per year from 1999~2004. Carbon storages in vegetation added to 264.13×10^3 t from 1990~1999 and it reduced to 70.75×10^3 t from 1999~2004. However, carbon storage in vegetation was steady increased by 212.04×10^3 t for 15 years. Thus, there has been a little carbon sink in the study area. But carbon storage in natural grassland was dramatically diminished, thus the state of local environment has been extremely frail. So, reasonable and scientific supervision of the land use and environmental protection should be attached special importance.

Keywords: RS & GIS; arid region; land use/cover change; vegetation carbon storage

(上接第 215 页)

Advance in Research of effect and mechanism of higher soil compaction on plant growth

ZOU Yang-jun, MA Feng-wang, HAN Ming-yu, WU Ya-wei

(College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The plant needs suitable soil bulk density for the growth. The soil physical, chemical and biological properties deteriorated when the soil bulk density is higher than normal. At the same time the high soil compaction affects the available nutrient contents, the soil enzyme activities and the number of soil biota. The growth of plant will be inhibited. At present high soil compaction has become one of the principal obstacle factors for sustainable development of Chinese agriculture. In this article we have described the relation of soil bulk density and soil physical, chemical and biological properties, the response of plant to high soil compaction. The research prospect of soil compaction is also discussed.

Keywords: soil compaction; soil bulk density; study progress