

力学可以为农业现代化作贡献^{*}

华云龙 张 伟

中国农业大学(东校区), 北京 100083

董务民

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘 要 农业现代化提出了许多与力学各个分支都有密切关系的问题. 从农田耕作、农业物料性质、农产品烘干、水果和蔬菜生产、农业生物环境、节水灌溉、农业水土资源合理利用和作物生长等方面, 介绍了有关的力学问题和目前的研究进展.

关键词 农业土壤力学, 土壤压实, 土壤侵蚀, 农业物料, 散粒体, 谷物, 水果, 蔬菜, 有限元法, 农产品损伤, 坚实度, 农产品烘干, 应力裂纹, 农业环境, 节水灌溉, 植物生物力学

1 引 言

农业是国民经济的基础. 没有农业的现代化, 就不可能有整个国民经济现代化. 我国农业正处在从传统农业向现代农业的过渡时期. 从世界各先进国家农业发展的历史经验来看, 科学技术进步是农业现代化的核心. 农业现代化提出了许多综合性的新问题, 往往需要多学科协同研究, 其中也需要力学工作者的参与并作出贡献. 本文参考国外现代农业的发展过程, 结合我国具体实际, 就农业生产的某些主要方面, 介绍农业现代化中提出的与力学各个分支有关的问题, 以及目前的研究进展^[1~4].

2 农业土壤力学^[1~7]

现代农业应用多种耕作机具及车辆. 研究农机具及农用车辆在工作过程中同土壤的相互作用, 对于提高生产效率、优化机具和车辆设计, 具有重要意义, 并逐渐形成相应的学科分支. 由于研究学者及研究内容侧重面不同, 相应地有不同的学科名称, 这里暂且统称为农业土壤力学.

本世纪 30 年代, 苏联科学院院士郭辽契金用数学、力学方法对犁体曲面、耕作过程进行了系统的研究, 并提出了“农业力学”的概念. 同一时期美国的尼科斯 (M. L. Nichols) 对耕耘机械和耕作过程进行了大量研究, 提出了作为土力学一个分支的土壤动力学 (soil dynamics). 土壤动力学研究的是受到移动机具以较高速度作用的土壤表层, 很少涉及表层以下 1 m 的土壤. 这一层土壤是典型的非饱和土, 性质极为多变, 很难定量描述. 这同土木工程中的土力学有较大的区别. 尼科斯和郭辽契金被认为是土壤动力学的先驱.

^{*}国家自然科学基金资助项目, 曾在中国力学学会成立 40 周年庆祝大会上报告, 后经补充修改

收稿日期: 1998 - 02 - 25

第二次世界大战期间，由于迫切需要研究军用车辆在泥泞地的机动性和在软土壤区的通过性等问题，推动了土壤动力学的研究，并逐渐形成了土壤-机器系统力学（soil-machine system mechanics）这一新学科。这门学科有2个分支，即耕作力学（tillage mechanics）和牵引力学（traction mechanics），后者也称为土壤-车辆力学。后来又创造了一个新词——地面力学（terramechanics）。地面力学含义较广，包括所有地面-机器系统的力学问题。

耕作力学是研究耕作机械在工作状态下，耕具与土壤的相互作用，其目的在于为耕作机械设计提供理论基础，使机具能以最低的能量消耗获得最佳的耕作效果。据统计美国农民每年要加工处理的土壤达2500亿吨^[2]。如果通过耕作力学的研究节约10%的能耗，经济效益是相当可观的。耕作必须满足农业技术要求^[3]。有些要求往往只有定性描述而难以量化，这是耕作力学研究的一个难点。另一个难点是土壤的力学性质复杂。土壤本构关系的研究是各项研究的基础。不同类型土壤的性质不同，而且土壤的力学性质随含水量及植物残株而变化。耕具和轮胎（或履带）作用于土壤时所产生的应力是动态的，在不到1秒钟的时间内，土壤产生变形和破坏。因此研究变形速度对土壤强度特性的影响是重要的。

牵引力学研究轮胎和履带的行走阻力和土壤推力、行走机构的通过性、转向性以及土壤的压实等。这些问题涉及行走机构与土壤界面的应力分布，这是高度几何和物理非线性问题，精确分析难度很大。

适当的土壤松紧度是作物良好生长发育的需要，播种后要对松土施以适当的压力，但农机具在田间工作时往往造成土壤过度紧实，即土壤压实。土壤压实是目前农业机械化水平较高国家关心的一个新问题^[8]。由于大型农机具有较高的生产效率，土地上的车辆和农机具总重量在逐年增加，土壤压实日益严重。土壤压实表现为耕作层和犁底层土壤物理力学性质发生变化：土粒受压缩，土壤孔隙中的空气和水被挤出或压缩，土壤压实的后果使植物根的穿透阻力增加，影响根的生长；土壤中容纳空气的孔隙减少，影响土壤中的气体交换；土壤导水率降低，影响水分渗透等，最终使作物减产。

土壤压实问题的研究内容有压实程度的预测和减少压实的方法等。目前广泛应用固体力学的理论和数值方法进行研究。从力学观点来看，压实问题就是半无限空间的一部分边界上作用有某种类型载荷时，所引起的应力应变及相应的体积应变分布。有些学者应用有限元法研究压实问题^[8,9]。由于土壤本构关系复杂，所受到的载荷也很复杂，压实预测并没有很好解决。

3 农业物料力学

农业物料包括农产品及其半制成品或成品，以及种子、农药、化肥、畜禽排泄物等，还包括农业生产所涉及的各种有机体，如植物茎、根、果实和动物毛、骨等等。农业物料力学知识是研究和设计农业机械、农产品收获和加工工艺，以及运输和包装方法、农产品质量检测方法和仪器设计等等的重要依据。

发达国家关于农业物料力学性质的研究已有很长的历史。美国的 Mohsenin 教授于1970年出版的《植物和动物材料的物理性质》^[10]一书，收集了大量前人研究成果，对农业物料力学的有关问题（如流变性质、接触应力、机械损伤、食品流变学、农产品的质构、水动力学和空气动力学特性、摩擦性质和颗粒材料力学行为等）作了全面总结，是这一领域中的重要文献。

农业物料的基本形态可以分为固体、流体和散体三种。各种水果、蔬菜、谷物、植物根和茎等等，属于固体物料。这些物料一般属于非线性粘弹性体，其力学参数往往随含水量、温度和变形速率而变化，而且一般不是均匀和各向同性的。测量这些物料的力学性质难度较大。例如为了保持恒定的试验温度和湿度，往往需要在特制的环境箱（environmental chamber）中进

行。有的物料（如水果肉）很难夹持，无法做拉伸试验。有的物料尺寸小（如谷粒），需要特殊方法和装置。经过长期实验研究，目前已积累了多种农业物料测试手段，包括静态和动态试验，规则试件试验和完整颗粒试验等等。

液态物料有蜂蜜、果浆、果汁、植物油、牛奶、奶油、蛋浆、液态动物饲料、动物排泄物等等。这些物料一般都属于非牛顿流体，性质差别很大。1957年 S. Blair 和 M. Reiner 出版了《农业流变学》(Agricultural Rheology) 一书，系统总结了当时农业物料学的研究成果。由于生产规模扩大，在很多情况下都需要有农业物料流变特性的知识。例如 80 年代美国每年大约加工处理 35 万吨液态蛋浆。在设计蛋品加工厂的蛋浆输送管道时，需要蛋浆在不同温度下流变特性的知识^[11,12]。又如工厂化畜禽业的发展，有大量动物废液需要处理，以充分利用这些废液，并控制其对环境的污染。所以 70 年代以来，国外对动物废液的流变特性及其处理方法进行了许多研究^[13,14]。

对于禽蛋业来说，蛋壳破裂是其经济损失的主要原因之一。国外对蛋壳强度的研究由来已久^[15]。造成蛋壳破裂的原因主要是碰撞和温度应力。发达国家的禽蛋一般要用热水冲洗干净后再上市销售。有些国家法律规定经过热水冲洗的禽蛋，必须立即置于低温下（通常为 7.2℃）冷藏，以延缓沙门氏菌 (Salmonella) 的发展。禽蛋经过这样冷热处理，蛋壳内有较大的温度应力，容易导致蛋壳破裂，造成经济损失。为了减少蛋壳破裂，人们首先需要了解这样冷热处理时蛋壳内的温度应力（例如通过有限元软件 ABAQUS 分析计算），同时通过实验手段测定蛋壳的力学性质，了解破裂的原因，从而选择合理的冲洗工艺^[16,17]。

当大量存放或输送谷物、菜籽、颗粒饲料和化肥等物料时，需要将这些物料看成松散介质。贮存这些散体物料需要建造专用的料仓。大型料仓从底部卸料时，物料从静止转入运动，在仓壁某处会出现很大的动态峰值压力，可能导致料仓损坏。某些散体物料（如颗粒饲料）有一定粘性，流动性不好，卸仓时容易在出口处结拱，影响正常工作和料仓安全。这些问题至今尚未很好解决。国外目前有些学者应用多种连续介质模型及数值方法求解。这些方法很复杂，但结果不很理想^[3,18]。散体物料的输送常常采用螺旋输送机。螺旋输送机合理设计的关键在于正确分析散体与螺旋体之间的相互作用。严格地应用散体力学模型来分析这个问题是十分复杂的，目前都采用不同的简化方法^[19,20]。

研究散体力学问题的一种较新的方法是所谓离散元法 (Distinct Element Method)。目前这种方法也在农业散体力学问题的研究中得到应用，例如农业料仓卸料和起拱等问题^[21,22]。

农业生产中常用空气或水作为载体，输送农产品或者从农产品中分离杂质。这就需要研究这些物料的空气动力学或水动力学特性，例如阻力系数、悬浮速度等。谷物的气流清选和输送，畜禽饲料和粪便的输送，水果和蔬菜的水力输送等，就是一些典型的例子。应用水作为载体输送水果和蔬菜是较新的方法，可以减少农产品损伤，费用又低廉，但需要有关的流体力学知识。

目前发达国家很重视农业物料力学的研究。“农业物理”(Agrophysics) 国际会议定期召开，农业物料力学是其中的重要内容^[23]。

4 水果和蔬菜的生物力学

现代水果，蔬菜的生产和销售过程中提出了许多与之有关的生物力学问题^[24,26]。这里我们只介绍目前研究较多的 2 个问题，即水果蔬菜的机械损伤 (Mechanical Damage) 及其防护措施，和水果蔬菜质量评价的力学方法。

有人估计在高度机械化的国家，水果和蔬菜由于机械损伤而引起的平均损耗约占总重量的 30~40%。新鲜水果蔬菜的机械损伤有 5 个主要来源：收获、加工、贮藏、包装和运输。生物

力学的主要作用是应用有关理论、实验和计算方法，预测水果蔬菜在上述各个环节中的响应，发展更好的方法和设备，使得所受的损伤最小^[25, 26]。

水果蔬菜在机械化收获过程中，不可避免地在相互之间，或同有关构件之间要发生碰撞。据英国的一项调查，土豆在收获时有 9 % 严重损伤，26 % 局部损伤^[27]。现代销售市场有的距农场有数千公里之遥。大规模运输通常使用集装箱。在集装箱内，农产品要受到静态挤压力的作用，在行驶时还会有一定的振动。在运输和装卸过程中，还难免会受到不同形式的碰撞，箱中的水果蔬菜就要受到冲击载荷的作用而可能损伤。为了测定在上述环节中水果蔬菜所受到的载荷，人们采用了多种现代力学测试手段。比较先进的一种是做成水果或蔬菜形状的所谓仪器球（IS: Instrumented Sphere）。这是以三轴加速度计为传感器，以微处理器为数据处理系统的测量装置。

由于静力挤压或动力碰撞，会引起水果蔬菜细胞壁破裂，或细胞液大量渗出，即发生淤伤（或碰伤，Bruising）。水果蔬菜由于碰撞引起的淤伤最为严重。对于桃子、黄瓜、柠檬和西红柿等，碰撞持续时间约为 9 ~ 26 ms，要比相应的农产品的最低阶固有频率的周期都长，因此碰撞引起的振动可以不计。这样，将 Newton 第二定律同 Hertz 弹性体接触公式结合起来，就可以用来计算农产品碰撞引起的变形、最大接触力和接触时间等参数，从而估计可能引起的损伤。如果要更精确地分析，就应当将农产品考虑为粘弹性体，应用粘弹性力学理论来研究这个问题。

为了分析水果和蔬菜内部的应力和变形，科技人员往往采用大型的有限元软件。例如，金瓜（Muskmelon）是中东地区的一种重要水果，美国 Purdue 大学科研人员曾研究应用机器人收获金瓜。通常机器人处理的是金属零件，而金瓜相对较大、较重且软。机器人的夹持器抓取金瓜时要施加一定的压力。这种压力不能太大，否则会造成金瓜损伤。他们应用有限元软件 ANSYS 研究了这种压力所引起的金瓜内的应力和变形，比较了夹持器平行夹口和 V 形夹口的应力分布^[28]。这些数据对设计收获金瓜的机器人提供了帮助。

西方消费者常用“拇指试验”方法来判定水果和蔬菜的质量或成熟度，即用拇指压其表面凭软硬感觉来判断。后来就有人设计了相应的测试仪器，其中最为常用的是 Magness - Taylor 压力计和 Effe - ge 压力计，并提出了一个相应的量——坚实度（Firmness）。这是一种表征水果和蔬菜的质构属性（Texture Property）的量。传统的测量坚实度的方法都要对水果和蔬菜造成损伤，而且速度慢。近年来西方发达国家进行了许多无损测量坚实度方法的研究。这些方法基本上都是通过分析水果、蔬菜对碰撞和振动的响应特点而设计的^[29, 30]。无损测量坚实度的方法对于水果按成熟度自动分选线的设计、包装或运输中的损伤估计、长期储存水果的品质评定，以及货架寿命的估计等，都有重要意义。

水果蔬菜都是由大量形状大小不同的多面胞体（Cell）无规则排列组成。每个胞体内部充满液体，在胞体和胞内液体间有一层阻止液体流动的薄膜。胞壁材料受到来自外部的载荷和内部液体的作用。有些科研人员试图研究单个水果蔬菜胞体的力学性质和整体组织宏观性质间的关系^[27, 31, 32]，从而更深入认识胞体生长生理学，胞体在外载作用下破裂的可能性，以及在成熟过程中胞壁、胞体饱胀度、胞体间粘结力的变化情况等。早期的研究工作是用 6 根弹簧铰接成六边形来模拟胞体^[31]，后来科研人员采用了封闭式的球形胞体和更复杂的多面体胞体模型，并应用薄膜理论得到了胞体变形与外力之间的关系^[32]。

5 农产品烘干引起的应力和裂纹

许多农产品在收获后需要烘干加工，去掉过多的水分，以便于保存。例如各种谷物（如稻米、玉米、小麦等）和豆类（如大豆等）在收获时含水量一般较高，要经过晾晒以后才能入库。现代农业采用机械化方式收获，速度快产量大，依靠自然方式晾晒无法满足要求，需要采用烘干机进行人工烘干。烘干机的效率高，但经烘干机烘干的谷物往往存在着微小裂纹，通常称为应力裂纹^[33] (Stress Crack)。这是因为人工烘干时采用的空气温度和气流速度都较自然晾晒方式高得多，烘干时谷物内部的温度场和湿度场变化剧烈。由于热胀冷缩和湿胀干缩效应，谷粒内的温、湿度场梯度引起了相应的热应力和湿应力 (Thermal and Hydro Stress)。若此应力水平超过谷物材料的强度极限，其内部将出现裂纹。对于大豆等豆类产品则表现为籽皮开裂。有应力裂纹的谷物整体强度较弱。例如稻谷在烘干后若有较高的裂纹比率，碾米时碎米率将增加，出米率下降，造成直接的经济损失。谷物从产地到被消费，要经过多次装卸输送，每次都受到相应的冲击载荷作用，容易引起谷粒破碎。有应力裂纹的谷物容易受到微生物和昆虫的侵蚀，种子的出芽率也降低。因此在人工烘干时，如何选择烘干温度、干燥介质速度和烘干时间等参数，减少应力裂纹，是一个具有重大经济意义的问题。

国外学者对这一问题的研究已有较长的历史。他们一方面通过比较不同烘干工艺过程的烘干试验结果，得到某些重要参数对应力裂纹定性影响的规律，以指导烘干生产实践。另一方面则深入探求裂纹产生的原因，以求得更为有效地控制裂纹产生的方法。这方面的工作主要为对谷物颗粒内部温度和水分传递过程的研究；应用数值方法（如有限元法）计算颗粒内部温度场和湿度场；应用有限元法等计算相应的热-湿应力场^[34,35]。为了给分析计算提供必要的材料参数，长期以来不断地有学者研究并测量了某些重要谷物（稻谷、玉米、大豆等）颗粒材料的传热、传湿性质，以及有关的力学参数^[36,37]。研究表明，谷物颗粒一般都由性质不同的几部分组成，属于粘弹性材料，其性质随温度、湿度而变化，可用热-湿流变简单材料描述 (Thermo-Hydro Rheologically Simple)。例如对于玉米胚乳，从70年代开始至今，先后有人应用拉伸、压缩、弯曲等试验方法测定了相应的松弛模量、反映热-湿粘弹性性质的温度-湿度迁移因子、以及有关的材料强度数据等。为了进一步了解裂纹产生的机理，科学家们应用电子显微镜、磁共振成像技术等先进方法，观察裂纹的尺寸特点，初始裂纹产生位置及其走向等。目前，这方面的理论研究取得了一些成果，能够定性解释某些实验现象，但是还远不能用来指导生产实践，还有很多工作要做。这里主要困难之一是材料性质很难准确测定。因为谷物颗粒很小，又不是均匀体，其性质受到多种因素（如温度和含水量）的影响，在测定有关力学性质及传热、传湿方面的参数时，难度很大，还有待进一步研究。如果从断裂力学和损伤力学的观点来研究这个问题，可能会对这个问题的解决提供新的途径。因为水分的迁移会给谷物颗粒造成损伤，在谷粒内部留下微小裂纹。但是目前还没有看到有关的研究工作。

木材在砍伐后一般要在专门的干燥炉内经过蒸汽加热去除过多的水分。烘干脱水要引起木材收缩，不均匀的收缩可能使木材发生裂纹或畸变，将影响木材质量^[33]。而且快速烘干常使木材表面硬化 (Caseharden)，也就是表面形成硬壳，而内部仍然湿润，影响加工。科研人员应用弹性或粘弹性模型，并应用有限元法和控制体积法 (Control Volume Method)，研究木材烘干引起的应力和变形^[38]。传统的木材烘干炉应用热空气对流加热。木材内部加热主要是以热传导方式进行的，表层收缩比心部大得多，从而可能产生较大的应力。新的射频加热/真空烘干机是一种内部加热方法，目前科研人员正在研究这种方法所引起的木材内部应力和变形的分布，以便更好地应用这种方法。

6 农业生物环境流体力学

为了在有限的土地上,尽可能少受或不受不利自然条件的约束,提高土地利用率和劳动生产率,现代农业建造了各种农业生产建筑设施,进行工厂化农业生产,也称为设施农业.这些建筑设施可分为三类^[1].第一类是植物性生产建筑,如温室、塑料大棚、工厂化育秧系统、食用菌生产车间、无土栽培室、人工气候室等.第二类是动物性生产建筑,如奶牛场、肉牛场、鸡场、猪场、水产养殖场等.第三类为农产品贮存保鲜建筑,如冷库、气调库、品种资源库、粮仓等.在这些建筑设施中,如何创造出满足动植物生长和贮存的最佳环境,是进行高效工厂化生产的关键性问题.农业生物环境工程学^[1]就是由于这种需求而逐渐发展形成的一门学科.这门学科的理论基础之一就是流体力学和热力学.

这些农业生产建筑设施的环境问题不仅取决于建筑结构和外界环境条件,而且同内部生物体的代谢作用、呼吸作用,植物体的光合作用等有关.当仅仅依靠建筑设施不能满足环境要求时,就需要根据热力学和流体力学原理分析建筑内的环境条件^[39](目前主要从传热学方面考虑),或者采用数值方法(如有限元法)分析计算^[40],并通过建筑内的环境控制设备进行控制.

粮仓内均匀良好的通风状态可以防止昆虫生长、水分凝聚和粮食霉变.因此了解仓内的气流分布十分重要.目前已有应用流体力学的数值分析方法计算仓内气流速度分布^[41],以便对低速区和滞流区采用适当的通风措施.

除了农业设施的生物环境问题外,运输鲜活农产品也存在着环境问题.例如活鸡装笼运输,鸡的密度很高,又没有必要的环境控制装置,可能导致高温和高湿度.通常这是通过车辆行驶而得到必要的通风换气.有统计数据指出,活鸡在运输中的死亡率一般为0.1%,而当天气较热时,可能达到1%.英国 Nottingham 大学和 Silsoe 研究所的科研人员对此作了一系列的研究工作^[42~44].他们首先对一辆卡车和一辆拖车组成的运输系统进行了实测.车辆在正常条件下行驶,测量了车辆表面的压力分布,并显示了流动情况(Flow Visualization).然后将这一运输系统制成模型,应用 Nottingham 大学的风洞设备进行了测量.实测的数据可以用来校正风洞的测量,而应用风洞测量可以得到比实测更多的空气动力学数据.第三步则是利用实测和风洞试验的数据作为边界条件,对上述运输系统建立一个计算模型,通过计算得到车辆内部流场,以及温度湿度等参数.通过和实测数据比较证明,这个计算模型是可靠的,可以用来预报车辆在运输过程中的环境情况.于是他们应用这个计算模型,研究了在更多的不同运输条件下,笼中活鸡的环境情况.从而研究如何优化有关条件.

7 节水灌溉农业

农作物要不断地从土壤中吸取水分和养分,水和土是农业发展的最基本的自然资源.我国耕地人均不到 0.1 hm^2 ,约为世界人均耕地的29%.我国人均水资源占有量仅为世界人均水量的1/4,而且降水量南北分布严重不均.南水北调是一种解决方法,但是无论当前还是多年以后,解决缺水问题的最重要方法仍然是推广高效节水技术^[45].

传统灌溉方法是地表灌溉.水从土壤表面流过和浸淹,借重力或毛管力渗入土中.这种灌溉方法水的利用率仅为40~60%.二战以后,首先出现了喷灌.喷灌使水喷入空中形成小雨滴,再降回田间.水滴的大小与工作压力,喷孔尺寸参数及喷头结构有关.大水滴射程较远,但土壤表面因水滴冲击易破坏团粒结构,造成土壤板结和土肥流失,并伤害作物幼苗.小水滴分布较均匀,但射程短,易受风吹逸,蒸发损失大.如何根据具体情况来正确选择参数,需要作一定的研究^[46].喷灌比地表灌溉节水20~50%.

后来又发展起来微灌和地下灌溉技术^[47,48]。微灌是将灌溉水过滤加压，通过管网输送分配到田间由安装在末级管道上的灌水器把水直接施于作物需水部位。按灌水器出流形式，微灌分为滴灌、微喷灌和滴流灌。微灌土壤水的运移主要靠毛管力的作用，不破坏土壤团粒结构，水的利用率可达90%以上。微灌输配水管网的管流问题，是要建立输水流量与管道直径，压力水头损失，管道长度等因素间的关系。有限元法是分析这个问题的有力工具^[49]。地下灌溉是在田间地下一定深度预埋带细孔的管道。灌溉水由细孔渗出，借毛细管作用湿润土壤。由于毛细管作用因土质而异，管道埋深要考虑到土质的因素。管道间距及长度的选择要使得横向及管道首尾湿润程度均匀。为了更合理地利用微灌和地下灌溉技术，需要研究土壤中水分的运动规律^[50]，以及作物根系发育和吸水模式，其中涉及到许多流体力学问题。

8 合理利用农业水土资源

上一节我们已经提到，我国的农业人均水土资源相对十分贫乏。城镇及工业发展又不可避免要占用农田，并对农田排放污水和废弃物。为了保持农业持续发展，精确合理利用农业水土资源是十分重要的。科学工作者把土壤-作物-大气作为一个连续系统（SPAC, Soil-Plant-Atmosphere Continuum），研究水在土壤和农作物中的运动规律。SPAC模型提出的时间不长，但已引起各国学者重视^[51]。土-水-植物-大气相互关系动力学^[7]（Dynamics of Soil-Water-Plant-Atmosphere Relationships）研究水分、空气、营养物质、盐分、农药、化肥等在土壤中的输送和积留过程，热量在土壤中的传递和温度变化过程，植物根系对土壤环境要求等相互关系规律。它对于设计和选择更精确合理的灌溉、排水系统和耕作技术，控制水土流失，防止和治理土地盐碱化，发展干旱及寒冷地区农业，合理施用化肥及农药，城市及工业污水和废弃物的农业利用等都有深远意义。

从能量观点来看，植物性农业生产以水和CO₂为基本原料，通过光合作用将太阳能转化为生物能，伴随光合作用并有大量水分从植物叶面蒸发。植物根系及土壤微生物、土壤动物都要求适宜的温度环境。有资料表明，在适宜于植物生长范围内，每提高土壤温度10℃可提高生产率2~3倍。如用黑色塑料膜覆盖农田，可允许短波辐射透过而抑制地面向空间的长波辐射，并阻隔土壤与大气的湿度和气体交换，可起到保水保温作用。用秸秆覆盖农田也可以起保温保水作用，但却减少了太阳辐射能的吸收。然而，地面风可透过秸秆之间的孔隙进入土壤内部。植物根系的呼吸作用及营养物质的摄入需要吸收O₂，排出CO₂。土壤微生物和土壤动物也需要与大气进行气体交换。如果透气不良，厌气性土壤微生物将分解出有害于植物的有毒物质。因此不同种植耕作方式，对于作物生长的影响是复杂的，需要全面分析。

土壤属于多孔介质。当土壤孔隙都充满水分时称为饱和土壤。随土壤饱和度下降，土壤孔隙中逐渐充入气体，此时的土壤为非饱和土壤。水分在土壤中的运动是由各点的土壤水势梯度所决定的，遵循达西定律（Darcy' law）。随土壤水分增加，土壤压实，作物生长及有机质含量等条件变化，土壤的孔隙度、孔隙尺寸和形状会发生变化。在非饱和土壤中，随土壤孔隙充气部分增加，实际水分流通面积缩小，且孔隙中的表面张力及毛管力作用逐渐显露。这些都使得土壤水分运动规律变得十分复杂。

土壤中的各种溶质随水分运动而运动。农民说“盐随水来，盐随水去”是有道理的。土壤水和空气中的溶质主要靠扩散（或弥散）及渗透方式运动，服从费克定律（Fick' slaw）。土壤中的盐分输运到表层土壤后，由于地表水分蒸发，若灌溉-排水措施不当，盐分在表层土壤中积累，将促成土地盐碱化。采用滴灌技术时，水分自滴头附近开始向各个方向扩散，盐分随水分运动，也可能造成表层土地盐碱化。灌溉过量不仅使一部分水量渗透到植物根以外，还

会促成土地盐碱化，并造成化肥流失，污染地下水。

土壤的类型及结构、土壤有机质含量、耕作、压实等条件千差万别，而且随深度变化，土壤含水量也是变化的，这使得对水分、气体、溶质在土壤中的运输过程及热量传递进行定量研究有极大的困难。尽管水-土-作物-大气相互关系规律经过多年的研究和实践，正在对农业发展发挥着重要作用，但要使它发展成一门工程化的实用学科，还需多学科的广泛协作和长期努力，其中需要力学做出应有的贡献。

目前土壤侵蚀已成为全球性环境灾害之一。从力学角度来看，土壤侵蚀是一种做功过程。由于风力和水力（流体介质）的作用，引起土壤颗粒的运动^[52,53]。土壤团块和团粒结构在水的浸润、雨滴冲击和径流冲刷下被破坏，细质土壤颗粒和养分随径流流走，土地支离破碎，不能再作为农田。风蚀是指松散的地表土壤颗粒被风吹起和输送的过程，以及地表物质受到风吹起的颗粒撞击而破碎的磨蚀过程。由于风蚀和水蚀，全世界每年农田损失达300万公顷。在美国的东半部，1934年曾发生过一次沙尘暴，使农业和交通运输受到了严重的灾害，引起了全世界对风蚀危害的关注。深入探讨土壤侵蚀的机制，对侵蚀过程作出科学的预测，寻找有效的控制途径，这是各国有关科学家和工程师的共同奋斗目标。通过研究风蚀和水蚀的力学机制，力学家可以对这个重要问题的解决作出贡献。

9 作物生长中的力学问题

随着生产和科学技术发展，人们试图对作物生长过程和影响生长的因素有进一步的了解，进而用来指导农业生产技术的研究工作。

植物体内有着多种流体流动^[24,54]。绿叶中制造出的养分通过韧皮部组织输往植物其它部分，根部吸收的水分和无机盐通过木质部输往叶（蒸腾作用）。从事植物生物力学研究的学者研究了植物维管系统的构造，以及植物体液在维管中流动的机理。作物根系在土壤中吸取水分和无机盐的过程，也是一个重要的研究问题。

小麦、水稻、玉米等作物由于茎秆倒伏^[3]而减产是一个严重问题。为了培育抗倒伏性能优良的品种，需要有科学的抗倒伏性的评估方法，并研究抗倒伏性与作物茎秆组织结构、材料性质参数的关系，从而加速优良品种的培育。

有些学者从力学角度研究了作物秧苗的出土力，根的生长所引起的应力场^[55]等问题，分析秧苗和根的生长所受到的穿透阻力与土壤性质之间的关系。还有人应用各向异性薄壳单元和非线性有限元法研究了叶表面气孔开启的机理等^[24]。

10 结束语

我国农业正在从传统农业向现代农业发展，发达国家的经验需要借鉴，但是我国农业又有特殊的问题需要解决。冯元桢先生曾就工程力学为中国西部山区建设做贡献（其中包括农业问题）提出了很好的建议^[57]，为我们树立了应用力学知识为农业服务的榜样。中国力学学会十分重视农业中力学问题的研究，曾召开了“农业工程中力学问题研讨会”^[3]。《力学进展》与《力学与实践》等杂志经常发表与农业有关的文章。我国农业现代化需要力学学科的参与，同时也为力学学科的发展提供了广阔的天地。希望有更多的力学工作者介入有关的课题研究，为我国农业现代化做贡献。

参 考 文 献

- 1 张伟主编. 农业工程概论. 北京: 中国农业出版社, 1997
- 2 吴起亚, 张德骏编. 农业工程力学. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989
- 3 中国力学学会办公室, 中国农业工程学会办公室编. 力学与农业工程. 北京: 科学出版社, 1994
- 4 华云龙, 张森文. 农业工程中的某些力学问题. 力学与实践, 1991
- 5 吉尔, 范登堡. 耕作与牵引土壤动力学. 北京: 中国农业机械出版社, 1983
- 6 Marshall T J, et al. Soil Physics. Cambridge University Press, 1988
- 7 曾德超. 机械土壤动力学. 北京: 北京科学技术出版社, 1995
- 8 余群. 见: 周一鸣主编. 农业土壤压实问题文集. 北京农业机械化学院, 1984
- 9 Gassman P W, et al. Analysis of track and wheel soil compaction. *Trans ASA E*, 1989, 32: 23 ~ 29
- 10 Mohsenin N N. Physical Properties of Plant and Animal Materials. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1970
- 11 Pitsilis J G, et al. Rheological properties of plain egg yolk, salted yolk and salted wholeegg. *Trans ASA E*, 1984, 27: 294
- 12 Pitsilis J G, et al. Rheological properties of liquid egg white. *Trans ASA E*, 1984, 27: 300
- 13 Chen Y R, et al. Rheological properties of aerated poultry waste slurries. *Trans ASA E*, 1976, 19: 128
- 14 Hashimoto A G, et al. Rheology of livestock waste slurries. *Trans ASA E*, 1976, 19: 930
- 15 Hamilton R M G, et al. 蛋壳的强度: 家禽科学家视为难题的实验力学. 董务民摘译. 力学进展, 1983 (3): 374
- 16 Lin J, et al. Measurement of eggshell thermal - mechanical properties. *Trans ASA E*, 1995, 38: 1769 ~ 1776
- 17 Lin J, et al. Strain in eggshell during cooling of eggs —— measurement and prediction using Finite Element Method. *Trans ASA E*, 1996, 39: 1005 ~ 1012
- 18 Askari H H, et al. Numerical prediction of hopper - bin pressures. *J Eng Mech, ASCE*, 1988, 114: 342 ~ 352
- 19 Jones D D, et al. Auger design for uniform unloading of granular material: 1. Rectangular cross section container. *Trans ASA E*, 1995, 38: 1157
- 20 Degirmencioglu A, et al. Development of screw conveyor performance models using dimensional analysis. *Trans ASA E*, 1996, 39: 1757
- 21 周德义等. 散粒农业物料孔口出流成拱的离散单元仿真. 农业工程学报, 1996, 12: 186
- 22 Sakaguchi E, et al. Simulation on discharging phenomena of grain by distinct element method. 农业机械学会志, 1996, 58 (4): 9 ~ 18
- 23 Rados Reznicek ed. Physical Properties of Agricultural Materials and Products. Hemisphere Publishing Corporation, 1987
- 24 孙一源, 余登苑. 农业生物力学及农业生物电磁学. 北京: 中国农业出版社, 1996
- 25 Sarig Y. 农产品所受撞击载荷综述. 华云龙译, 董务民校. 力学进展, 1993, 23 (1): 397
- 26 Peleg K. 水果和蔬菜的生物力学. 董务民、钱民全译. 力学进展, 1987, 17 (1): 101 ~ 109, 1987, 17 (3): 397 ~ 410
- 27 刘建辉. 农作物材料的力学分析. 见: 余同希主编. 英国应用力学前沿研究课题选介. 北京: 科学出版社, 1996
- 28 Cardenas - Weber M, et al. Melon material properties and finite element analysis of melon compression with application to robot gripping. *Trans ASA E*, 1991, 34: 920 ~ 929
- 29 Abbott J A, et al. Nondestructive dynamic force/ deformation measurement of kiwifruit firmness. *Trans ASA E*, 1995, 38: 1809 ~ 1812
- 30 Delwiche M J, et al. Second generation impact force response fruit firmness sorter. *Trans ASA E*, 1996, 39: 1025 ~ 1033
- 31 Pitt R E. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. *Trans ASA E*, 1982, 25: 1776 ~ 1784
- 32 Gao Q, et al. Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure. *Trans ASA E*, 1991, 34: 223 ~ 238
- 33 Hasatani M, et al. Drying induced strain and stress: a review. *Drying Tech*, 1996, 14: 1011 ~ 1040
- 34 Sokhansanj S, et al. 大米内水应力和热应力的有限元研究. 俞稼 译. 力学进展, 1983, 13: 370
- 35 Irudayaraj J, et al. Stress analysis of viscoelastic materials during drying: I - Theory and finite element formulation. *Drying Technology*, 1993, 11 (5): 901 ~ 927
- 36 Balastreire L A, et al. Relaxation modulus for corn endosperm in bending. *Trans ASA E*, 1978, 25 (4): 767 ~ 772
- 37 Waananen K M, et al. Failure properties of yellow - dent corn kernels. *Trans ASA E*, 1988, 31 (6): 1816 ~ 1832
- 38 Perre P, et al. A control - volume procedure compared with the Finite Element Method for calculating stress and strain during wood drying. *Drying Tech*, 1995, 13: 635 ~ 660
- 39 李元哲等. 日光温室微气候的模拟和实验研究. 农业工程学报, 1994, 10 (1): 130

- 40 Heber A J , et al. Pattern and turbulence in an experimental livestock building. *J Agric Engng Res*, 1996 , 64 : 209 ~ 226
- 41 冯云田, 华云龙. 粮仓通风问题的数值研究. 北京农业工程大学学报, 1992 (4)
- 42 Hoxey R P , et al. An investigation of the aerodynamic and ventilation characteristics of poultry transportation vehicles: part I, Full - scale measurements. *J Agric Engng Res*, 1996 , 65 : 77 ~ 83
- 43 Baker C J , et al. An investigation of the aerodynamic and ventilation characteristics of poultry transportation vehicles: part II, Wind tunnel experiments. *J Agric Engng Res*, 1996 , 65 : 97 ~ 113
- 44 Dalley S , et al. An investigation of the aerodynamic and ventilation characteristics of poultry transportation vehicles: part III, Internal flow field calculations. *J Agric Engng Res*, 1996 , 65 : 115 ~ 127
- 45 宋健. 也论“谁来养活中国人”. 中国人口, 资源与环境, 1997, 7 (4)
- 46 Wen - Jaur Chang , et al. Sprinkle droplet effects on infiltration , I: Impact simulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1993 , 119 (2) : 142
- 47 郑耀泉, 刘婴谷. 灌溉技术的新进展. 力学进展, 1993, 23 (3) : 415 ~ 423
- 48 许一飞. 国外农业高效用水的研究、应用及发展趋势. 节水灌溉, 1997 (4)
- 49 Hathoot H M , et al. Analysis and design of trickle - irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1993 , 119 : 756
- 50 Omary M , et al. Three - dimensional movement of water and pesticide from trickle irrigation : Finite element model. *Trans ASA E*, 1992 , 35 (3) : 811
- 51 孙菽芬. 土壤 - 植被 - 大气统一体内水分循环和能量交换 ——SPAC 模型. 力学进展. 1984 , 14 (1) : 475
- 52 戚隆溪, 王柏懿. 土壤侵蚀的流体力学机制; (1) ——水蚀. 力学进展, 1995, 25 (4) : 501
- 53 戚隆溪, 王柏懿. 土壤侵蚀的流体力学机制; (2) ——气蚀. 力学进展, 1996, 26 (1) : 41
- 54 Ram R H. 绿色植物的流体力学. 董务民译. 力学进展, 1983, 13 (4) : 475
- 55 Faure A G. Stress field developed by root growth: Theoretical approach. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1994 , 58 (1) : 53
- 56 冯元桢. 工程力学如何为开发中国西部做贡献. 力学进展, 1989, 19 (1) : 1

THE ROLE OF MECHANICS IN AGRICULTURAL MODERNIZATION

Hua Yunlong Zhang Wei

China Agricultural University (East Campus) , Beijing 100083

Dong Wumin

Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080

Abstract Many problems in agricultural modernization are closely related to mechanics. This paper reviews the research of these problems , including tillage , properties of agricultural materials , drying of agricultural products , production of fruits and vegetables , agricultural bioenvironment , water saving irrigation , control of agricultural soil and water resources , and growing of plants , and so on.

Keywords agricultural soil mechanics , soil compaction , soil erosion , agricultural materials , granular material , grains , fruit , vegetable , finite element method , mechanical properties , mechanical damage , stress crack , firmness , agricultural environment , water saving irrigation , plant biomechanics