

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.02.021

通风过程中进风相对湿度对仓储粮堆 温度和水分的影 响研究

王 艺, 戚禹康, 孔令今

(山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101)

摘 要: 温度和水分含量是两个重要的物理变量, 在研究谷物储存时品质变化起到很大作用。通风用于冷却粮堆并保持温度恒定, 以防止水分迁移。良好的通风条件对粮仓内存储安全有显著影响。目前, 通风空气相对湿度对粮堆水分影响的研究相对较少。采用数值模拟和实验研究相结合的方式, 探索和比较因不同进风相对湿度而引起的通风过程中仓储的小麦温度和水分变化规律。结果表明: 进风相对湿度较低时冷却干燥效率更高, 小麦粮堆降温更快速, 并将昆虫和霉菌的活动保持在较低水平。

关键词: 小麦贮藏; 水分含量; 调湿机; 相对湿度; 通风

中图分类号: TS205.9; S379.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)02-0125-05

Study on the influence of inlet air relative humidity on temperature and moisture of warehouse grain stack during ventilation

WANG Yi, QI Yu-kang, KONG Ling-jin

(College of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan, Shandong 250101, China)

Abstract: Temperature and moisture content are two important physical variables that play a considerable role in the study of quality changes during grain storage. Ventilation is used to cool the grain pile and keep the temperature constant to prevent moisture migration. Good ventilation conditions have a significant impact on the storage safety in the granary. At present, the research on the influence of relative humidity of ventilation air on the moisture of the grain reactor is relatively rare. The changes of grain temperature and moisture during ventilation caused by different inlet air relative humidity were explored and compared by a combination of numerical simulation and experimental research in this paper. According to the results, the cooling and drying efficiency is higher when the relative humidity of the inlet is lower, which makes the wheat grain pile cool more quickly and keeps the activities of insects and molds at a lower level.

Key words: wheat storage; moisture content; humidity control machine; relative humidity; ventilation

圆筒仓内的微环境是由温度、水分、干物质损耗、谷蠹等构成的复杂生态系统。对圆筒仓储粮通风微环境进行模拟研究, 可为粮食的安全储藏提供理论依据。研究发现, 小麦储藏粮堆温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 水分在 12%~12.5% 之间时有利于安全储

藏, 可以有效避免虫害的发生, 抑制粮堆中生命体的活动, 延缓粮食的劣变。空气温度和相对湿度是影响谷物储藏品质和陈化的两个重要因素^[1]。一旦小麦粮堆入库, 其质量就受仓储系统控制和管理的影响。近几年来, 在储藏期间通过通风冷却粮食的方法越来越受到关注, 因为它提供了一种在降低杀虫剂水平的同时又控制昆虫的可能性^[2-4]。

Thrope^[5]认为粮堆内的物性参数对通风过程非常重要, 粮堆缝隙间空气的温度和湿度尤其需要关注, 粮食的生物特性使得通风过程中的粮食

收稿日期: 2019-10-11

基金项目: 国家重点专项(2016YFD0400100, 2016YFD0401002); 国家粮食公益专项(201513001)

作者简介: 王艺, 1996年生, 女, 硕士, 研究方向为建筑环境中热湿传递过程的研究。

会出现吸湿和解吸湿的可能, 风机中空气温度和水分对粮堆降温降水过程有明显的影 响。当粮粒间空气的相对湿度低于 65% 时, 微生物无法繁殖^[6], 仓储小麦的品质与粮堆的安全水分含量有关。因此, 低成本的通风系统将成为粮堆储存和冷却的一种有效方式^[5]。一些研究人员开发并验证了数学模型, 预测通风过程中仓储粮堆热量的传递^[6-9]。但这些研究的侧重点主要是通风温度对小麦仓储环境的影响, 很少从进风湿度方面进行探究。

研究基于通风实际数据采集, 结合 CFD 模拟分析, 研究通风干燥粮食过程中通风空气湿度对粮堆水分的影响, 并根据模拟结果得出更合理的通风方式, 使小麦在最佳的环境下储存, 以期为机械通风湿度的选择提供依据。

1 材料与方 法

1.1 谷物储存系统实验装置

采用黄淮冬麦区的周麦 18 号小麦, 使用通风干燥实验装置, 风机和金属圆柱形筒仓进行实验 (如图 1)。调湿机用于产生低相对湿度 (RH) 的空气。通过湿度计监测空气特性。通过控制风机速度来调节气流。设置一组连接数据采集的温湿度传感器测量系统来记录温度和粮堆湿度的测量值。

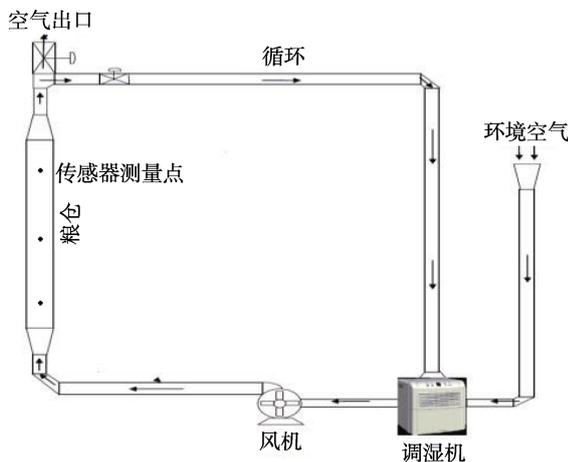


图 1 谷物储存系统实验装置图

仓储谷物的平衡水分含量 Me 与相对湿度 RH 有关。霉菌生长和螨虫繁殖在相对湿度为 65% 时停止。改进的亨德森方程 (1) 用于预测温度为 30 °C 和不同相对湿度 (40%, 50% 和 60%) 条件下的平衡水分含量。

$$Me = 0.01 \left[\frac{(-\ln(1 - RH))}{B(T + C)} \right]^{1/N} \quad (1)$$

式中: Me 为平衡水分含量, % (干基); T 为温度, °C; RH 为相对湿度, %; B、C 和 N 为 颗特定谷物的经验常数, $B = 2.31 \times 10^{-5}$, $C = 55.815$ 和 $N = 2.29$ 。

1.2 数值模拟的方法

连续性方程如式 (2) 表达。

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a)}{\partial t} + \nabla(\rho_a u) = 0 \quad (2)$$

其中 t 为时间; u 是空气的表观速度或达西速度; ε 为孔隙率; ρ_a 为空气密度。

动量方程如式 (3) 表达。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon}(u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla p}{\rho_a} + \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_a} \nabla u \right) - \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} - \frac{1.75\rho_a(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} |u| \cdot u \quad (3)$$

方程 (3) 描述的是通风时粮堆内部强迫对流流动及其阻力的动量方程, 方程右边第三项为粘性阻力, 右边第四项为惯性阻力, 都基于 Ergun 方程得到。其中, ε 为孔隙率, 当 $\varepsilon=1$ 时为空气区域流动方程, 即 N-S 方程; 当 $\varepsilon \neq 1$ 时为粮堆区域流动方程, 即达西-布林克曼方程。 ρ_a 为空气密度, ρ_b 为粮堆的容重, d_p 为谷物颗粒的等效直径, u 为粮堆内部空气的表观速度或达西速度。 p 为压力, t 为时间, ∇ 为微分算子, μ 为空气的动力粘度。

对流传热方程如式 (4) 表达。

$$\rho_a \varepsilon c_a + \rho_a (1 - \varepsilon) (c_g + c_w W) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a \bar{u} T) = k_{eff} \nabla^2 T + h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \quad (4)$$

其中 W 为粮食的含水量; c_a 、 c_g 、 c_w 分别为空气、粮食和水的比热; ρ_a 为空气密度; k_{eff} 为粮堆的有效导热系数; h_s 为对流换热系数; $h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t}$ 为热源项。

对整个粮堆来说, 其水分迁移过程可以如式 (5) 表达。

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \bar{u} w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w \quad (5)$$

式中: w 为含湿量; t 是时间; \bar{u} 为不同方向上的表观速度; S_w 为水分源项; ρ_a 为空气的密度; ε 为孔隙率; D_{eff} 为空气中的水分穿过粮堆

过程中的有效扩散系数，通风过程中水分的迁移是一个复杂的过程，分子的扩散、空气的流动、穿过的路径曲折程度等对其都有影响，有效扩散系数往往由实验测定。

2 结果与分析

在实验和模拟期间，小麦水分含量的变化如图 2 所示。可以看出实验和模拟得到的结果非常相似。在整个研究期间，所有情况下的安全水分含量几乎保持不变。在冷却初期，粮堆间温度梯

度的驱动力和粮粒间空气湿度的蒸汽压差是造成水分损失的驱动力，使小麦的水分含量迅速下降。在通风期结束时，水分含量下降至小麦粮堆的平衡水分，借助小麦吸附等温线预测了小麦的平衡相对湿度。从夏季到冬季，对于 12%和 14%的初始湿基含水量，安全储存条件下的平衡相对湿度保持小于 70%^[14]。图 2 表示在通风的初始阶段有较高的脱水率，随后逐渐趋向于不变。对于不同的相对湿度值，实验数据与模拟结果无显著差异。

图 3 所示为冷却通风期间，小麦粮堆顶部、

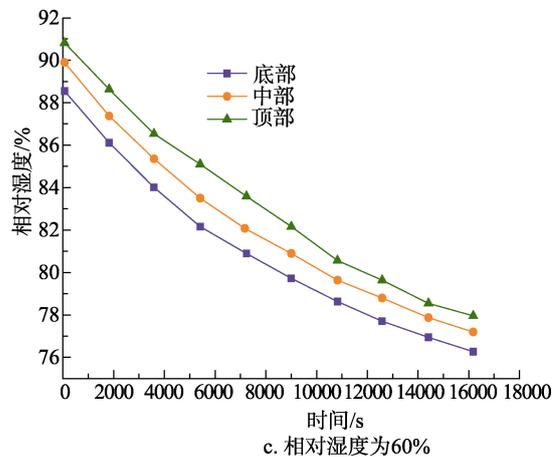
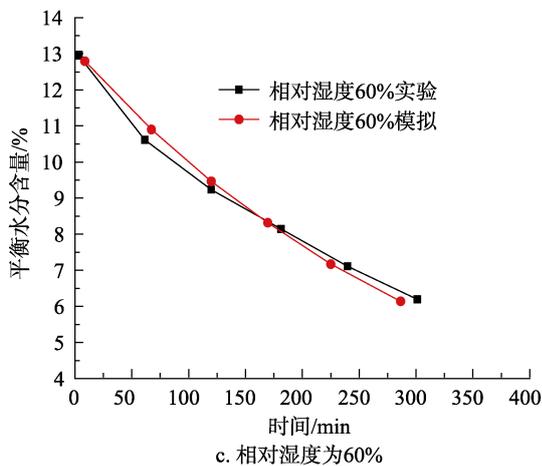
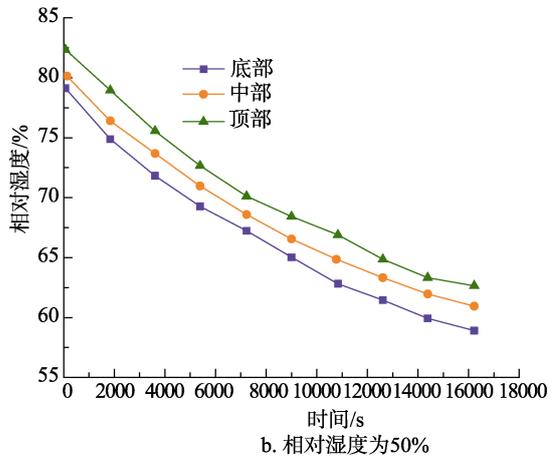
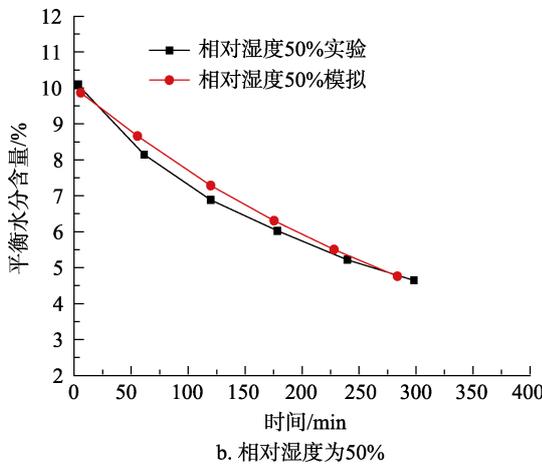
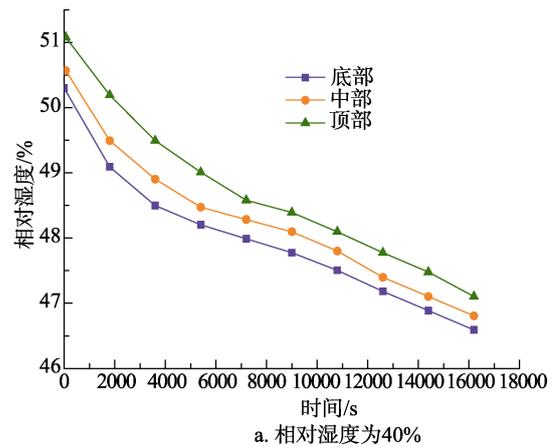
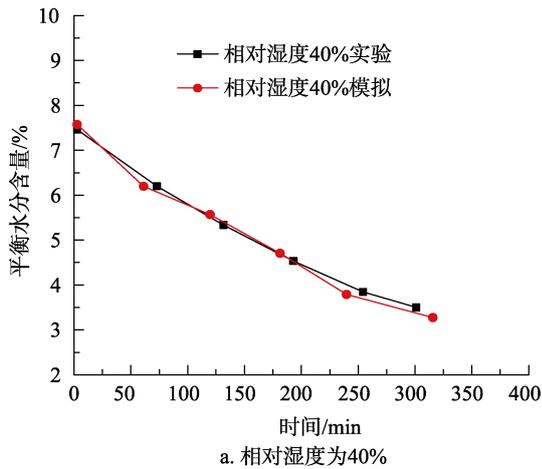


图 2 小麦粮堆在 30 °C 时的平衡水分含量

图 3 小麦粮堆在 30 °C 时三个区域粒间空气的相对湿度变化

中心和底部的粒间空气的相对湿度。筒仓中小麦粮堆的三个不同部分在冷却过程中的冷却时间不同。小麦粮堆表层相对湿度较高，其相对湿度的上升是表层小麦吸热的结果，在该过程中小麦释放水分并使粒间空气湿润。由此验证了环境空气的相对湿度影响谷物的冷却效率^[13]。

在夏季，当环境温度在夜间降低到所需温度阈值以下时，使用自动控制器打开鼓风机进行通风，从而利用一天当中最冷的空气送入粮仓以达到令人满意的冷却效果^[14]。但夜间的相对湿度较高，可达到 70%以上，可以采用干燥实验装置降低进风空气的相对湿度，既能保证冷却过程适当又减少了通风的使用时间。

在小麦粮堆顶部，离空气进风入口最远且被冷却时间最长。小麦温度高于环境温度，约为 32 °C。图 4a 表示了谷物的冷却时间较短，冷却速度较快，达到了 29 °C 的温度。如图 4b 所示，由于底部的小麦初始温度约为 40 °C，当该层在进风温度和相对湿度分别为 30 °C 和 50% 条件下进行强制通风时，小麦温度在 5 h 内降至 28 °C。对小麦进行快速冷却必须将温度较低的环境空气吹入到温度较高的谷粒中，且温差增大会使冷却速度加快。如图 4 所示，设置 4~6 °C 的温差使粮堆冷却速度较快。对于初始温度分别为 41.5 °C 和 37.1 °C 的高温小麦，在研究结束时筒仓内的温差分别为 12.5 °C 和 7.8 °C。粒间空气的高相对湿度分别从 89.7% 和 80.5% 降至 77% 和 60.7%。进风相对湿度为 60% 时，相对湿度差约为 12.5%，进风相对湿度为 50% 时，相对湿度差约为 19.8%。

3 结论

当进风相对湿度分别为 40%、50%、60% 时，经比较发现 40% 的空气能快速使谷物冷却干燥，由此验证了环境空气相对湿度影响谷物的冷却效率，进风相对湿度较低时冷却干燥效率更高。

采用除湿装置可以获得合适的有效通风效果，低湿度的进风湿度效果更明显，这是因为进风相对湿度低于粮堆平衡相对湿度时，湿差变大使粮粒处于解吸湿状态，粮粒吸热使周围空气温度降低，进风湿度更低使粮粒解吸湿更快，降温效果更明显。根据这项研究的结果，低湿度的气

流可以使得小麦粮堆降温更快速，昆虫和霉菌的活动保持在较低水平。

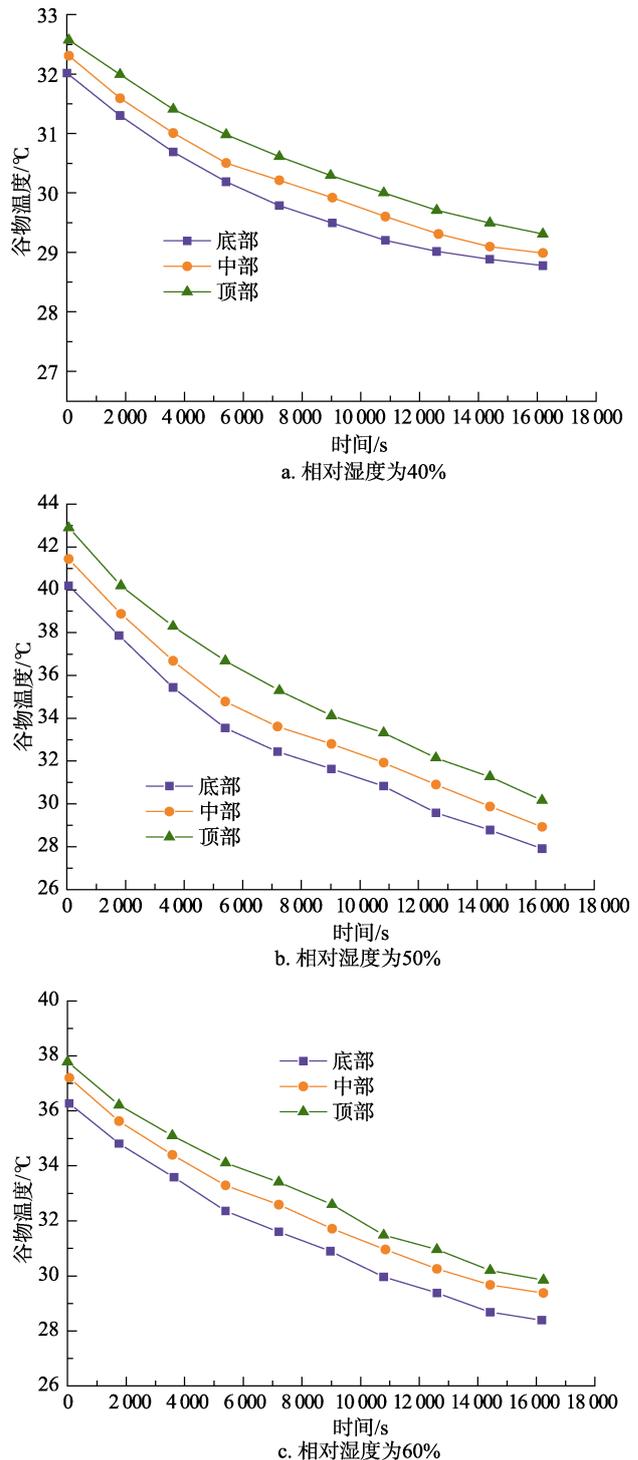


图 4 小麦粮堆在 30 °C 时三个区域谷物的温度变化

参考文献:

[1] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 基于温湿度场云图的小麦粮堆霉变与温湿度耦合分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 260-266.

[2] WANG Y, DUAN H, ZHANG H, et al. Modeling on heat and mass transfer in stored wheat during forced cooling ventilation[J]. J. Thermal Sci., 2010, 19(2): 167-172.

[3] CASCADA M E, ARTHUR F H, AKDOGAN H. Temperature

- monitoring and aeration strategies for stored wheat in the central plains[C]. CIGR XVth World Congress, Chicago, Illinois, USA July 28-July 31, 2002.
- [4] COLLINS L E, CONYERS S T. Moisture content gradient and ventilation in stored wheat affect movement and distribution of *Oryzaephilus surinamensis* and have implications for pest monitoring[J]. *J. Stored Prod Res.*, 2009, 45: 32-39.
- [5] THORPE G R. Modelling heat and mass transfer phenomena in bulk stored grains[C]. Proceedings of the 6 th International Working Conference on Stored-product Protection, 1995, 1: 359- 366.
- [6] HEMIS M, CHOUDHARY R, WASTON D G. A coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds[J]. *Biosystems Eng.*, 2012, 112(3): 202-209.
- [7] SUN D W, WOODS J L. Deep-bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: a test bed for ventilation control strategies[J]. *J. Stored Prod. Res.*, 1997, 33(4): 299-312.
- [8] LOPES D C, MARTINS J H, MELO E C, et al. Aeration simulation of stored grain under variable air ambient conditions[J]. *Postharvest Biol. Technol.*, 2006, 42: 115-120.
- [9] HAMMAMI F, BEN MABROUK S, MAMI A. Modelling and simulation of heat exchange and moisture content in a cereal storage silo[J]. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2016, 22: 207- 220.
- [10] ONDIER G O, SIEBENMORGEN T J, MAUROMOUSTAKOS A. Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice[J]. *J. Food Eng.*, 2010, 100: 445-550.
- [11] BEN MABROUK S, KHIARI B, SASSI M. Modelling of heat and mass transfer in tunnel dryer[J]. *Appl. Thermal Eng.*, 2006, 26: 2110-2118.
- [12] LOPES D C, MARTINS J H, FILHO A F L, et al. Aeration strategy for controlling grain storage based on simulation and on real data acquisition[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 63: 140-146.
- [13] AKDOGAN H, CASADA M E. Climatic humidity effects on controlled summer aeration in the hard red winter wheat belt[J]. *Trans. ASAE*, 2006, 49(4): 1077-1087.
- [14] ARTHUR F H, CASADA M E. Directional flow of summer aeration to manage insect pests in stored wheat[J]. *Trans. ASAE*, 2009, 26(1): 115-122. 

· 信息窗 ·

城市不断扩张，但也可以更加健康！

全球有超过一半的人口生活在城市。到 2050 年，城市人口将翻倍，城市化已成为世界上最具变革性的趋势之一。迅速城市化促进了住房、交通和基础设施等多个领域里创新解决方案的出现，有一个关键领域往往受到忽视：**粮食安全和营养**。

如果想为子孙后代打造健康、可持续的城市，则须重新审视城市的运行方式。粮农组织“城市粮食议程”为全球决策者将粮食系统纳入城市规划提供支持。通过五种方式，使城市更健康 and 可持续。

1、促进都市农业 全世界超过 8 亿人在从事都市农业。通过保护城市地区的农业用地，可缩短供应链，减少将粮食从农村运输到城市过程中排放的二氧化碳。在城市内部生产和销售更多的新鲜食品可减少食品分配对环境的影响，增加包容性地方供应链的机会，并改善营养食品的获取途径，如农贸市场。

2、鼓励健康膳食 生活方式和饮食模式受到食物可供类型和价格的重要影响。城市里存在着大量的快餐和方便食品供人选择，可选的食品往往是高能量、深加工食品。所有城市都可在推广健康膳食方面发挥更大的作用。2014 年，新加坡启动了“健康膳食计划”，鼓励食品经营者使用更健康的成分。仅一年多时间，健康可选食品的数量就翻了一番。

3、减少并管理粮食浪费 70% 的全球粮食供应由城市地区的人口消费，但大部分都遭到丢弃。不同区域粮食浪费的原因各异，但总体而言，粮食规划欠妥、

包装不足、储存不当和文化习俗都导致了这一问题的出现。未进行回收或再利用的浪费粮食在垃圾填埋场里越积越多。通过在市区回收安全营养食品并通过慈善机构和食品银行再分配、利用丢弃食品堆肥或生产能源，可大幅度减少粮食浪费。

4、扩大绿地，改善环境健康和生活方式 随着城市面积的不断扩大，绿地正在消失。树木和绿地不仅美观，还有利于改善空气质量、降低城市气温、鼓励体育锻炼并提高整体健康水平。粮食系统需要与绿色环境一同进行规划和管理，以控制污染，鼓励健康膳食和体育锻炼。

5、在城市与周边农村地区之间重新建立联系 城市与城市地区的运作离不开农村地区。城市在食物、劳动力、供水和食物垃圾处理方面主要依靠邻近的农村地区。对粮食系统进行规划过程中，在城市与更大的地区之间重新建立联系，有助于确保健康、安全和营养食品的供应，促进农民在粮食系统内创造就业岗位。

能否实现可持续发展目标的关键在于城市，这就是为什么可持续发展目标 11 - 建设包容、安全和可持续的城市如此重要。粮农组织“城市粮食议程”帮助各国政府和各机构打破城乡差距，促进可持续粮食系统的思考。

（节选自：联合国粮农组织（FAO）官方微信公众账号，2020 年 2 月 12 日）