

胡萝卜薄片红外干燥光学特性研究

刘玉辉 李腾训 王相友 魏忠彩

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 为揭示胡萝卜薄片在红外干燥过程中的光学特性, 观察并分析了胡萝卜薄片的外观品质, 测量了胡萝卜髓部和皮层部所含可溶性固形物含量, 对干燥过程中薄片髓部和皮层部两表面进行了质构测定, 并对其表面的全光谱反射特征、吸收光谱与超微结构进行了分析。研究表明: 物料单位能耗与绝对温度的5次方呈线性负相关; 当物料含水率降至20%时, 出现明显褐变, 说明红外干燥比同温度下热风干燥的物料褐变程度高; 在物料表面温度60℃时干燥1.5 h, 物料髓部上表面硬度高于下表面, 皮层部下表面硬度高于上表面, 说明此时髓部上表面含水率高于下表面、皮层部上表面含水率低于下表面, 皮层部表面对红外线吸收能力强; 在350~2 500 nm光谱曲线上, 物料皮层部对任意波段光的反射率均高于髓部, 且在短波段差异更明显; 扫描电镜图像显示, 物料髓部比皮层部孔隙直径大、迂曲度低, 有利于红外线向深层传递; 透射电镜图像显示, 物料皮层部比髓部细胞内颗粒物数量多、颗粒大。根据散射理论, 在物料皮层部, 短波段光发生了米氏散射, 长波段光发生了瑞利散射; 在物料髓部, 短波段光发生了瑞利散射, 几乎没有米氏散射; 在同一部位, 表面粗糙多孔的横切薄片比平整致密的纵切薄片对光的反射率低。

关键词: 胡萝卜; 光学特性; 红外干燥; 散射; 能耗

中图分类号: TS255.36 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0342-09

OSID:



Optical Properties of Carrot Slices during Infrared Drying

LIU Yuhui LI Tengxun WANG Xiangyou WEI Zhongcai

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to reveal the optical properties of carrot slices during infrared drying, the appearance quality of carrot slices during infrared drying was analyzed. The content of soluble solids in pulp and cortex of carrot slices, the texture of pulp and cortex of carrot slices during drying were determined. The surface reflectance spectrum, absorption spectrum and ultrastructure were analyzed. It was found that the energy consumption per unit of material had linear negative correlation with the 5th power of absolute temperature. The browning occurred when the moisture content was decreased to 20%, and the browning degree of the infrared drying material was higher than that of the hot air drying material at the same temperature. When it was dried at 60℃ for 1.5 h, the hardness of the upper surface of the pulp was higher than that of the lower surface, and the hardness of the lower surface of the cortex was higher than that of the upper surface, which indicated that the moisture content of the upper surface of the cortex was lower than that of the lower surface, and the moisture content of the upper surface of the pulp was higher than that of the lower surface. The spectral curve of 350~2 500 nm showed that the reflectance of cortex was higher than that of medulla in any wave band, and the difference was more obvious in the short wave band. Scanning electron microscope images showed that the diameter of the pores in the medulla was larger and the tortuosity was lower than that in the cortex, which was conducive to the transmission of infrared rays to the deep layer. Transmission electron microscope images showed that the number of particles in cortex was more than that in medulla. According to the scattering theory, short wave light had Mie scattering, and long wave light had Rayleigh scattering in the cortex, short wave light had Rayleigh scattering, and there was no Mie scattering in the medulla. The reflectance of the cross section with porous surface was lower than that of the longitudinal section with dense surface.

Key words: carrot; optical properties; infrared drying; scattering; energy consumption

收稿日期: 2020-12-02 修回日期: 2021-01-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31271908)

作者简介: 刘玉辉(1973—), 男, 博士生, 主要从事农产品加工技术研究, E-mail: liuyuhui@sdut.edu.cn

通信作者: 王相友(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工技术与装备研究, E-mail: wxy@sdut.edu.cn

0 引言

红外辐射加热具有能量利用率高、干燥速率快、加热均匀、热惯性小等优点^[1],在果蔬干燥领域应用越来越广泛^[2]。目前,利用红外辐射对果蔬干燥的研究主要集中在提升干燥效率、降低能耗和提高干制品品质等方面^[3-15],这些研究主要从宏观上探索如何利用红外光能优化果蔬干制品的品质和提高对红外辐射能的利用率,而对红外线与果蔬组织之间光学作用机理的研究较少,没有从微观上对红外线在物料中的反射、散射和吸收特征进行深入细致的分析,故无法从根本上揭示红外辐射干燥的内在机理。

红外辐射干燥是红外辐射能最终转化为物料的内能、并在物料内部进行传递与耗散的过程^[16]。果蔬结构复杂,所含物质种类繁多多样,很难通过构建数学模型的方式对红外线在果蔬中的传递特性进行准确的描述,对光与物料进行的干涉与衍射、偏振与色散等作用机理和作用效果也很难进行精准测量。本文基于红外线对果蔬的微观作用机理,研究分析红外辐射能转化为果蔬内能的机制。

胡萝卜含水率高,所含成分复杂,对不同波长的光具有不同的折光率,且其中所含种类繁多的原子以及复杂多变的化学键,对不同波段红外线的吸收以及红外线在物料中传输过程的阻尼状态,都具有复杂的形式^[17]。本文选用胡萝卜为研究对象,通过测量与分析胡萝卜干燥过程中的外观品质、质构特征、光谱特性、超微结构、能耗、可溶性固形物含量以及含水率的变化规律,分析各指标与红外线之间的作用特性和关联性,从而探索红外线在物料中的传播规律和光学机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

红森胡萝卜,购自山东省淄博市农贸市场,新鲜,品质优良。

YHG-500-BS 型远红外恒温干燥箱,上海跃进医疗器械厂;DHG-0246A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验仪器设备有限公司;TP-114 型电子天平(量程 220 g,精度 0.1 mg),丹佛仪器北京有限公司;物料盘若干;样品厚度可调节刀具;镊子;手套;打孔器;与试验样品直径一致的模具;Quanta250 型扫描电子显微镜,FEI 香港有限公司;JEOL-1200EX 型透射电子显微镜,日本 JEOL 公司;LKB-V 型切片机,瑞典 LKB 公司;FW100 型高速万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;TGL-20M 型高

速冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;TA.XT2i/50 型质构仪,英国 Stable Micro System 公司;LabSpec 4 型全光谱仪(光谱范围 350~2 500 nm;400~1 000 nm,分辨率 3 nm;1 000~2 500 nm,分辨率 6 nm;IRIS-L50 型卤素灯(50 W 石英卤素灯,可调光,光源可变高及角度);计算机等部件),美国 ASD 公司。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 湿基含水率

胡萝卜薄片的切割、红外干燥和湿基含水率测定方法均参照文献[18]。

1.2.2 全光谱成像数据的采集与标定

开机,预热 30 min,打开 R3 软件,确认联网;打开“Control”菜单的“Spectrum Save”选项,设置参数;打开“Control”菜单的“Adjust Configuration”选项,设置参数;将光谱仪探头对准白板,点击“OPT”图标优化光谱仪的积分时间,点击“WR”图标,仪器会自动重新采集暗电流,几秒钟之后界面上显示一条反射率为 1 的平直线,按空格键存储当前的光谱曲线。把光谱仪光纤探头瞄准胡萝卜样品的数据采集部位,此时界面上显示的就是被采集部位相对反射率光谱线,按空格键存储当前的光谱曲线。

1.2.3 超微结构观察与测定

胡萝卜的微观结构观察与测定参考文献[19]。

1.2.4 可溶性固形物含量测定

取 2.5 g 胡萝卜切碎加入 5 mL 离心管中,放入冷冻研磨机以 2 000 r/min 研磨 10 min(12 个样可以同时磨),将钢珠取出,倒入 3 mL 离心管,用石英砂配平,以 8 000 r/min 离心 5 min,用吸管吸取上层悬浮液滴于手持折光仪镜片上,用手持折光仪读数并记录。

1.2.5 质构测定

取干燥时间 1.5 h 无翻动的横切样品,用直径 10 mm 的打孔器在胡萝卜的髓部和皮层部打孔,形成圆柱体小丁,采用 TA.XT2i/50 型质构仪,HDP/BSK 型探头,设置探头测试前、测试中、测试后的速度分别为 2.0、1.0、1.0 mm/s,记录测试过程中的时间-应力曲线。对样品进行全质构分析,触发力 5 kg,每组试样重复测定 5 次。胡萝卜的硬度用第 1 次压缩变形 30% 的峰值力(N)表示^[20]。

1.2.6 干燥能耗

将胡萝卜横向切成厚度 3.5 mm 的薄片,取样 550 g,用红外辐射加热系统(物料表面温度分别为 50、55、60、65、70、75、80、85℃,辐照距离 30 cm,功率 1 200 W)对物料进行干燥。每隔 30 min(含水率降至 20% 后,每隔 15 min)取样一次并称量,再

将所取样品置于 105℃ 热风恒温箱内,干燥至湿基含水率降至 8.7% 时,停止试验。每个试验重复 3 次。

胡萝卜单位能耗表征每蒸发胡萝卜内单位质量的水分需要消耗的电能^[21],计算公式为

$$N = \frac{Wt}{G}$$

(1)

式中 N ——干燥能耗,MJ/kg

W ——额定输入功率,kW
 t ——干燥时间,h
 G ——去除水分的质量,kg

2 结果与分析

2.1 干制品的外观品质

图 1 为在干燥温度 60℃ 条件下物料在试验过程中的外观品质。



图 1 样品的外观品质

Fig. 1 Appearance quality of samples

1. 每隔 0.5 h 翻动 1 次 2. 无翻动 3、5. 热风干燥 4、6. 红外干燥

由图 1a 可以看出,在干燥过程中,每隔 0.5 h 对物料翻动 1 次,干物料平整、舒展,皱缩度低,未经翻动的样品髓部向上突出,皮层部向下突出。由图 1b 可以看出,热风干燥的物料褐变不明显,红外干燥的物料褐变度较高,且髓部的褐变度高于皮层部。由图 1c 可以看出,干物料的褐色在复水后退去,说明褐变产物溶于水。由图 1d 可以看出,干燥过程中,物料髓部逐渐向上突出,皮层部逐渐向下凹陷,说明在同一时间点上,髓部下表面含水率下降快,收缩应力高于上表面,皮层部恰好相反,上表面含水率下降快,收缩应力高于下表面,在两表面不均

衡应力的作用下,薄片发生扭曲变形。干燥时间为 4 h 时,出现明显褐变现象,测定此时物料的湿基含水率约为 20%,具有典型的美拉德反应特征^[22]。

2.2 干燥过程中物料的质构特征

取干燥时间 1.5 h 无翻动的物料,对髓部和皮层部分别做 3 组重复的全质构分析(TPA)试验,得表 1 所示数据。在 TPA 各项指标中,与含水率相关的硬度指标存在显著性差异。由于新鲜果蔬中含水率越高,硬度越大^[8],因此,在干燥时间为 1.5 h 时,髓部上表面的含水率高于下表面,皮层部下表面的含水率高于上表面。

表 1 红外干燥 1.5 h 时胡萝卜样品的 TPA 指标

Tab. 1 TPA index of carrot sample after infrared drying for 1.5 h

部位	硬度/g	弹性指数/mm	凝聚性指数/(g·s)	粘性指数/(g·s)	咀嚼度/(g·mm)	恢复性指数/(g·s)
髓部上表面	(15 204.4 ± 319.8) ^a	(0.532 ± 0.173) ^a	(0.723 ± 0.021) ^a	(10 796.47 ± 202.30) ^a	(5 782.72 ± 139.50) ^a	(0.502 ± 0.041) ^a
髓部下表面	(13 983.9 ± 295.9) ^b	(0.540 ± 0.131) ^a	(0.707 ± 0.018) ^a	(10 190.75 ± 553.40) ^a	(5 481.13 ± 336.50) ^a	(0.485 ± 0.027) ^a
皮层部上表面	(6 445.9 ± 281.9) ^d	(0.527 ± 0.210) ^{ab}	(0.664 ± 0.021) ^b	(4 251.48 ± 232.70) ^c	(2 650.59 ± 237.10) ^c	(0.386 ± 0.013) ^b
皮层部下表面	(8 921.1 ± 312.4) ^c	(0.493 ± 0.205) ^b	(0.718 ± 0.027) ^a	(6 366.98 ± 322.54) ^b	(3 151.63 ± 312.56) ^b	(0.461 ± 0.027) ^a

注:同列数据不同字母表示差异显著,下同。

2.3 光谱特征

对样品进行全光谱数据采集,得到图 2 所示的反射率图谱。

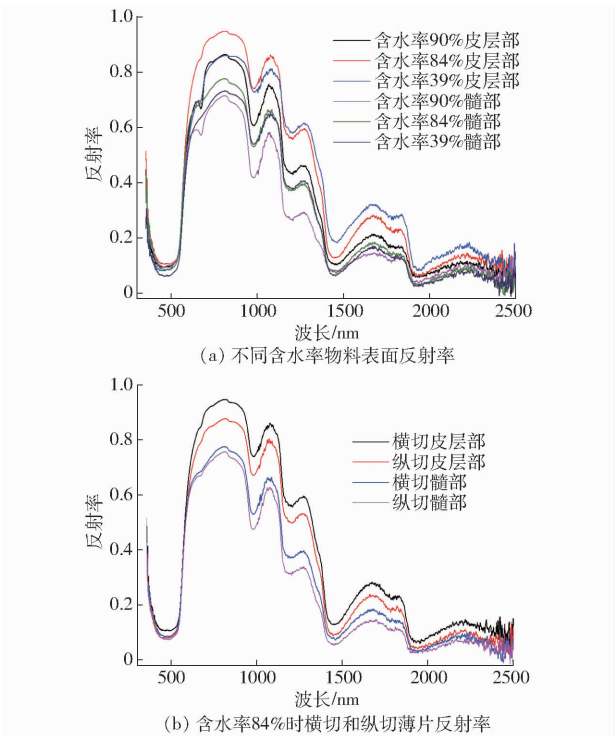


图 2 物料表面反射率图谱

Fig.2 Reflectance spectrum of material surface

由图 2a 可知,在含水率相同的条件下,髓部对任意波段光的反射率都低于皮层部,说明髓部和皮层部表面结构的差异对光反射率的影响比较明显;在相同部位,含水率越高,物料表面对任意波段光的反射率越低;物料对 600 ~ 1 200 nm 波段比对 1 800 ~ 2 500 nm 波段光的反射率高,说明短波光与长波光在物料表面的作用机理存在差异。由图 2b 可以看出,无论是髓部还是皮层部,横切样品在相同区域对光的反射率都高于纵切样品;无论是采用横切方式还是纵切方式,髓部对光的反射率都低于皮层部。

研究资料表明:水对 980 nm 波长光谱的吸收能力较其它物质敏感,对 1 100、1 380、1 870 nm 波长附近红外线有更高的吸收率系数^[23]。从图 2 的反射率谱线可以看出,物料在 950、1 200、1 400、1 800 nm 附近的近红外波段存在吸收峰,这几个吸收峰的位置与水的吸收特征谱线具有较高的吻合度,因此可以认为胡萝卜内部成分对红外辐射吸收占主导作用的是水分。

2.4 超微结构

若研究物料与红外线的作用机制,需对物料的超微结构进行分析。在表面温度 60℃ 条件下经红外干燥后的物料髓部和皮层部的扫描电子显微镜图

像(SEM)和鲜物料透射电子显微镜(TEM)图像分别如图 3、4 所示。

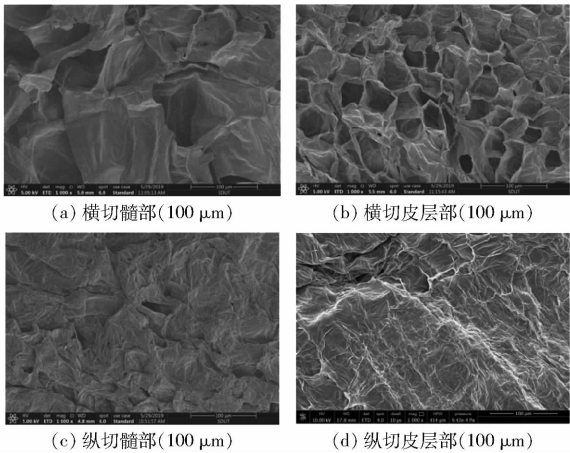


图 3 干物料的 SEM 图像

Fig.3 SEM images of dry materials

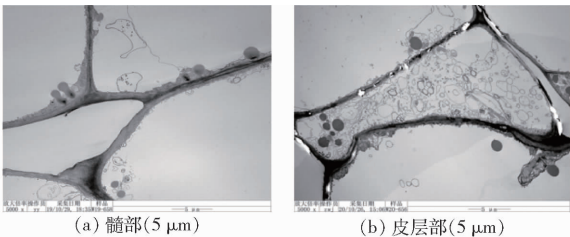


图 4 鲜物料的 TEM 图像

Fig.4 TEM images of fresh materials

由图 3 可以看出,相对于皮层部,髓部干样品孔隙壁平整度高,孔隙排列规则,结构松散,孔隙内部空间大,闭合孔隙数量少;髓部孔隙更好地保留了原生态的空间架构,孔隙形状大致呈方管或圆管状直通状态,孔隙迂曲度低,孔隙尺寸和比面都比较大,通透度高;与横切样品相比,纵切样品的表面平整,结构致密,仅在髓部有少量孔隙,皮层部孔隙结构不明显。

由图 4 可以看出,髓部细胞内细胞器较少且发育不完全,整个细胞膜内空间几乎被液泡占满,细胞器被细胞膜和液泡膜限定于紧邻细胞壁的狭小区域内,细胞在总体上呈水球形态;皮层部细胞内细胞器清晰可见,细胞器占空比较大,呈颗粒状,较小颗粒的直径约为 0.1 μm,较大颗粒物直径在 1 μm 以上,细胞呈水球中掺杂大量杂质的形态。

2.5 可溶性固形物含量

尽管细胞结构复杂,内容物对光线的折射系数差异影响较大,不易对其进行精准测量,但水溶液所含溶质的浓度会影响溶液的折光率^[24],由于胡萝卜所含物质除水外,主要是蛋白质、淀粉、葡萄糖、纤维素及其它碳水化合物,无机盐类物质含量较少,所以,胡萝卜中水溶液的溶质主要是以可溶性糖类为主的固形物。对新鲜胡萝卜的髓部和皮层部所含可

溶性固形物质量分数进行测量,结果如表 2 所示。

表 2 髓部和皮层部可溶性固形物质量分数

Tab. 2 Mass fraction of soluble solids in medulla and cortex

位置	次序			均值
	1	2	3	
髓部	6. 2	6. 4	6. 6	6. 4 ± 0. 2
皮层部	8. 9	8. 7	8. 8	8. 7 ± 0. 1

由表 2 中可溶性固形物质量分数差异可以看出,新鲜胡萝卜髓部的可溶性固形物质量分数低于皮层部,说明髓部的水溶液浓度低于皮层部。这与髓部细胞内液泡体积较大和细胞器数量较少、体积较小的特点相吻合。由于浓度高的液体具有较高的折光率,因此,皮层部比髓部对红外线的折光能力强。

2.6 干燥温度对单位能耗的影响

在功率、辐照距离和物料质量均相同的情况下,分别在表面绝对温度为 323. 15、328. 15、333. 15、338. 15、343. 15、348. 15、353. 15、358. 15 K 条件下对物料进行红外干燥,运用式(1)进行运算,得到表 3 所示的单位能耗与干燥温度的关系。

表 3 单位能耗与干燥温度的关系

Tab. 3 Relationship between unit energy consumption and drying temperature

绝对温度/K	干燥时间/h	单位能耗/(MJ·g ⁻¹)
323. 15	9. 5	(22. 70 ± 0. 48) ^h
328. 15	8. 1	(19. 36 ± 0. 47) ^e
333. 15	7. 1	(16. 97 ± 0. 47) ^f
338. 15	5. 9	(14. 10 ± 0. 48) ^e
343. 15	5. 0	(11. 95 ± 0. 48) ^d
348. 15	4. 1	(9. 80 ± 0. 48) ^e
353. 15	3. 4	(8. 13 ± 0. 47) ^b
358. 15	2. 6	(6. 21 ± 0. 72) ^a

由表 3 可以看出,干燥温度越高,单位能耗越低,二者存在负相关关系。同时,干燥温度越高,差异越明显,说明随着干燥温度升高,干燥箱体温度升高吸收的能量、干燥箱向外部环境散失的能量均增大,致使测量误差随温度升高而增大。

由黑体辐射的光谱辐射出射度公式^[25]可知光谱辐射出射度峰值与绝对温度的 5 次方成正比,公式为

$$M_{b\lambda_m} = BT^5$$

(2)

式中 $M_{b\lambda_m}$ ——辐射出射度峰值,W/(m²·μm)
 B ——常数,取 1. 286 7 × 10⁻¹¹ W/(m²·μm·K⁵)
 T ——绝对温度,K

由表 3 可以得出,红外干燥的单位能耗与物料

表面绝对温度的 5 次方呈线性负相关,在 50 ~ 85℃ 范围内,温度越高,干燥速率越快,单位能耗越低,与式(2)相吻合。

3 理论分析与讨论

3.1 散射的影响

根据胡萝卜细胞的结构特点,将细胞及细胞内颗粒物均抽象为球形模型,将红外光场分解为入射场、散射场和球内场,则散射问题可以归结为散射体(细胞及细胞内颗粒状物质)对入射光的衍射、入射光在散射体表面的反射以及光线进入散射体内部形成的折射 3 部分^[24]。

当入射光波长与散射体直径相近时,满足米氏散射条件。根据米氏散射理论,散射光强与入射光强、散射体的关系^[26-27]为

$$I(\theta) = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} (|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2)$$

(3)

式中 $I(\theta)$ ——散射光强,cJ
 I_0 ——入射光强,cJ
 $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ ——散射光的振幅函数
 θ ——散射角,rad
 r ——光源与散射体的距离,μm
 λ ——入射光波长,μm

从式(3)可以看出,米氏散射的散射强度与频率的 2 次方成正比,前向散射光强度高于后向,后向散射光强度高于侧向,方向性特征明显^[28-29];入射光波长越小,散射光能量越集中分布在散射角较小的范围内,相对折射率的变化对散射光分布的影响不大,不同半径散射体的散射光强的分布差异较大^[24]。

由图 4 可知,尽管胡萝卜细胞大小不等,但总体上细胞直径在 10 μm 左右,细胞内大颗粒物的尺寸在 1 μm 左右。当入射光波长位于 100 ~ 1 000 nm 之间时,尽管在胡萝卜皮层部的散射具有较强的前向性,但后向的强度同样不容忽视,而该波段光线在照射髓部时,由于缺少散射必需的颗粒物作散射体,因此,该波段光线在髓部的米氏散射较弱,这是图 2a 光谱曲线上皮层部比髓部在 100 ~ 1 000 nm 波段反射率高的主要原因。

当入射光波长达到甚至超过颗粒物直径的 10 倍时,由于颗粒物的直径远小于波长,散射体内的球内场在相位上与球外场的区别可以忽略,光波通过散射颗粒所需要的时间积累可以忽略,散射微粒形成电偶极子,振荡频率与入射光相同,所发射子波即为散射波,此时,米氏散射可近似为瑞利散射,近似散射光强分布^[24]为

$$I(\theta) = \frac{8\pi^4 a^6}{r^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 I_0 (1 + \cos^2 \theta) \quad (4)$$

式中 a ——细胞器颗粒半径, μm
 m ——细胞器颗粒与细胞质液体之间的相对折射率

由式(4)可以看出,瑞利散射光强的角分布特征对所有大小和折射率的颗粒都相同,前向散射与后向散射呈对称性;散射光强与颗粒粒径的 6 次方成正比;散射光强与入射波长 4 次方成反比。

对照图 4 可知,波长在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的红外线在物料中会存在米氏散射,波长在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内的红外线在物料中主要表现为瑞利散射。由于皮层部颗粒物数量多,因此,波长在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间的光在皮层部的瑞利散射比髓部明显,表现为图 2a 光谱曲线上皮层部比髓部对 $1 \mu\text{m}$ 以上波段光反射率高。

由于瑞利散射在不同方向上均有散射光线,因此,在垂直于光的传播方向上的散射光仍然具有较强的能量。因此,两种散射方式相比,发生在长波段的瑞利散射作用效果更明显,表现为散射光的大部分散射能量最终会被皮层部上表面附近的物料吸收,转化为该部位物料的内能,皮层部上层获得的能量高于下层。当上层水分与物料分离的速率高于下层水分向上传递的速率时,下层含水率就会高于上层,表现为表 1 中皮层部下表面硬度高于上表面。

由于髓部颗粒物含量较少,两种散射的影响都较弱,红外线在髓部表现出更强的穿透性。在水分迁移过程中,当上层水的散失量与下层水的输入量之差小于下层水向上的迁移量时,下层的含水率就低于上层,此时表现为上表面的硬度高于下表面。

3.2 水对红外线的吸收作用

3.2.1 水的光谱吸收特征

由于新鲜胡萝卜的湿基含水率高达 $89\% \sim 91\%$ ^[30],需要分析红外线与水作用的机理,充分发挥水对红外线的广谱吸收作用,提高胡萝卜干燥效率和提升干制品的品质。文献[31]发现在 $3\,900 \sim 3\,600 \text{ cm}^{-1}$ (伸缩振动)和 $1\,800 \sim 1\,400 \text{ cm}^{-1}$ (弯曲振动)区间,水对垂直偏振光吸收较强,对水平偏振光吸收较弱。文献[32-33]发现水和离子溶液在低频范围内的特征峰包括 60 cm^{-1} 氢键弯曲、 200 cm^{-1} 氢键伸缩和 600 cm^{-1} 分子摆动,在液体状况下这些氢键还以皮秒量级的速度不停地断裂-形成,与此同时,水分子在液体状态下还以皮秒量级的速度在旋转,此外氢原子的量子效应也在其中发挥着作用。由图 5^[25]可以看出,除去 $300 \sim 900 \text{ nm}$ 波段的光存在一个吸收低谷外,其余波段的光波均能够被水强

烈吸收。在水中大量氢键的作用下,水的比热容较大,气化热值较高,物料在脱除自由水阶段会吸收大量的能量而温度保持相对稳定,因此,在干燥前期可采用较高的辐射功率,既能提高干燥速率,又可避免营养物质因温度过高而被破坏。

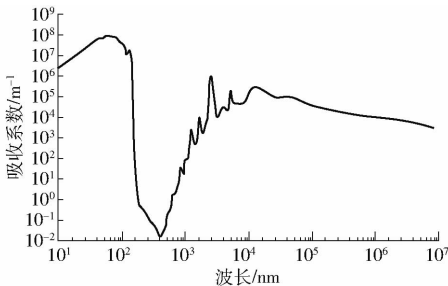


图 5 水的吸收谱线

Fig. 5 Absorption spectrum of water

3.2.2 水的活性与美拉德反应

胡萝卜中的水分子是以团簇的形式存在的,团簇的大小与水中溶解的溶质颗粒大小和分子极性有关。由表 2 可知,胡萝卜所含可溶性固形物较多,胡萝卜中的水分子与溶液中的有机溶质相互作用时,在数量庞大的弱氢键作用下,能够形成活性较低的水化层结构,溶解的颗粒在表面不饱和键力或极性作用的影响下,吸引偶极水分子,使极性水分子在颗粒表面形成定向、密集、有序排列的水分子层^[34-35],这就极大地降低了水的活性。红外线可以通过破坏水分子氢键的方式,减少水分间的缔合力,使大的水分子团簇分解为小的水分子团簇^[36],提高水的活性。

影响美拉德反应的因素除去物料自身的因素之外,还有温度、反应时间、水分活度和 pH 值、金属离子和化学试剂等外界因子^[37]。试验发现,采用相同的物料,在相同的环境温度、湿度、干燥温度和干燥时间条件下,经红外干燥的样品,非酶褐变的程度高于热风干燥,可见,造成美拉德反应加剧的主要原因是红外辐射增加了水的活性。美拉德反应产物具有抗氧化活性,但是其抗氧化能力受多重因素的影响^[38-39],另外,尽管美拉德反应的产物有一定的营养价值,但目前对胡萝卜干制品的利用均采用复水后再使用的方式,这就降低了褐变产物的利用率,同时美拉德反应消耗了物料中原有的营养成分,造成了营养流失,降低了胡萝卜干制品的外观品质。由于美拉德反应程度与温度存在正相关关系^[37],因此,实际生产中,可以通过降低干燥温度的方式对美拉德反应进行抑制。

3.2.3 细胞组织结构对水的影响

胡萝卜具有植物根的基本特征,如图 6 所示,组织细胞沿植物生长方向伸长^[40],这种结构与图 3 中

呈现的横切样品孔隙数量多、深度大的特征相吻合。红外线穿过横切薄片的每层细胞时通过的距离要大于纵切薄片。因此,厚度相同的条件下,纵切薄片比横切薄片层级数量多。层级数量的增加,既降低了红外线与水直接作用的几率,又降低了水的迁移能力。

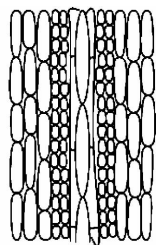


图6 胡萝卜细胞组织示意图

Fig. 6 Tissue diagram of carrot cells

文献[18]研究发现,胡萝卜在干燥失水过程中,细胞内容物会以固态颗粒物的形式附着于横向的细胞壁上,阻塞该部位细胞壁上的孔隙,降低了细胞的横向通透性,在失水过程中,细胞与邻近细胞之间会发生一系列生物化学反应,形成纵向通透、横向阻隔的网状空间架构。因此,无论是在干燥初始状态,还是干燥中间阶段,横切薄片更有利于对红外辐射能的吸收利用。

由图3a、3b可以看出,在横切方式下,细胞在切面处被截成开放的微小腔体,垂直入射的红外波进入该微腔后易形成谐振特征明显的相干光场,相干光场产生的光学力导致约束它的腔体产生微小形变,在一定条件下的腔体形变会导致空腔边界产生持续不断的机械振动^[41],微腔的振动对腔内水分向外迁移形成助推作用,振动产生的机械能又会迅速转化为物料的内能,使物料温度快速上升,腔内水分

子运动速率加快,水的迁移能力增强。同时,由于细胞形成的微腔结构对光场具有束缚作用,使得腔内光场因具有极高的功率密度而产生级联混频效应,在腔内产生一系列宽带的梳状光谱^[42],提高了光能向内能转变的速率,使空腔中水的迁移能力迅速提高。空腔结构对光的作用表现为:粗糙多孔的横切面比光滑平整的纵切面在图2b谱线上呈现出较低的反射率。表面空腔快速脱水后对物料内部相邻空腔形成负压,提高了相邻空腔内水分向外迁移的能力,相邻腔体的脱水速率增大,逐层依次向内传递,形成由表及里的连锁效应,使物料内部水分在整体上向表面迁移的速率加快。

3.2.4 水溶液浓度对光吸收的影响

水溶液浓度越高,对水的折射作用越明显^[43-44],由表2可知,胡萝卜皮层部可溶性固形物质量分数高于髓部。因此,皮层部具有更高的折光率,红外线自物料上表面射入后,光入射到皮层部后会产生更大的偏转角,降低了光传播到下表面的几率,使下表面能够接收到的辐射能量降低。因此,与髓部相比,物料皮层部下表面水的迁移能力较弱。

4 结论

(1)采用横切方式既能增大胡萝卜薄片与水与红外线直接作用的几率,发挥孔隙对红外线的吸收能力,削弱红外线在物料表面的散射作用,提升物料对红外辐射吸收的均匀度,又可减少薄片的层级数,降低水的迁移阻力。

(2)在干燥前期应采用较高的辐射功率,以提高自由水的脱除速率,并降低能耗;在干燥后期应采用较低的温度,对美拉德反应进行抑制。

参 考 文 献

- [1] SEYHUN K A, İBRAHİM D, EMEK M D. Infrared drying kinetics of blue mussels and physical properties[J]. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 2019, 25(1): 1-10.
- [2] 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 177-182. WANG Xiangyou, CAO Ruibing, SUN Chuazhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 177-182. (in Chinese)
- [3] CARLOS V M, FRANCISCO J G N, ARTURO G V, et al. Relationship of the drying process of a corn grain with the thermal emissivity and optical interference in the mid infrared range[J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3470-3476.
- [4] ALAEI B, CHAYJAN R A. Drying characteristics of pomegranate arils under near infrared-vacuum conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(5): 469-479.
- [5] LEE D I, LEE J H, SHIN Y S, et al. Far infrared drying characteristics of the microwave-steamed sweet potato[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2019, 44(2): 187-193.
- [6] JAFARI F, MOVAGHARNEJAD K, SADEGHI E. Infrared drying effects on the quality of eggplant slices and process optimization using response surface methodology[J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127423.
- [7] BORDA-YEPES V H, CHEJNE F, DAZA-OLIVELLA L V, et al. Effect of microwave and infrared drying over polyphenol content in *Vaccinium meridionale* (Swartz) dry leaves[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(1): e12939.
- [8] SADEGHI E, MOVAGHARNEJAD K, ASL A H. Parameters optimization and quality evaluation of mechanical properties of infrared radiation thin layer drying of pumpkin samples[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(2): e13309.
- [9] THANIMKARN S, CHEEVITSOPON E, JONGYINGCHAROEN J S. Effects of vibration, vacuum, and material thickness on infrared drying of *Cissus quadrangularis* Linn[J]. Heliyon, 2019, 5(6): e01999.

- [10] KALEJAH A K, ASEFI N. Influence of vacuum impregnation pretreatment combined with IR drying on quince quality with shrinkage modeling by ANN[J]. Chemical Engineering Communications, 2019, 206(12):1661–1675.
- [11] ZARE D, NADERI H, RANJBARAN M. Energy and quality attributes of combined hot-air/infrared drying of paddy[J]. Drying Technology, 2015, 33(5): 570–582.
- [12] BAEGBALI V, NIAKOUSARI M, NGADI M O, et al. Combined ultrasound and infrared assisted conductive hydro-drying of apple slices[J]. Drying Technology, 2019, 37(14): 1793–1805.
- [13] BURDO O, BEZBAKH I, SHYSHOV S, et al. Experimental studies of the kinetics of infrared drying of spent coffee grounds[J]. Technology Audit and Production Reserves, 2019, 1(1): 4–10.
- [14] RASHID M T, MA H, JATOI M A, et al. Multi-frequency ultrasound and sequential infrared drying on drying kinetics, thermodynamic properties, and quality assessment of sweet potatoes[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(5): 332–338.
- [15] PIANROJ Y, WERAPUN W, INTHAPAN J, et al. Mathematical modeling of drying kinetics and property investigation of natural crepe rubber sheets dried with infrared radiation and hot air[J]. Drying Technology, 2018, 36(12): 1436–1445.
- [16] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54(10): 2917–2933.
- [17] SLOOT P M, FIGDOR C G. Elastic light scattering from nucleated blood cells; rapid numerical analysis[J]. Applied Optics, 1986, 25(19):3559–3565.
- [18] 刘玉辉,王相友,魏忠彩. 胡萝卜微观区室结构对红外干燥效率和水分迁移的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(23): 293–300.
- LIU Yuhui, WANG Xiangyou, WEI Zhongcai. Effects of carrot microstructure on infrared drying efficiency and moisture transfer[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 293–300. (in Chinese)
- [19] 刘玉辉,王相友,魏忠彩. 红外辐射对胡萝卜切片脱水作用机制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 350–359.
- LIU Yuhui, WANG Xiangyou, WEI Zhongcai. Mechanism of infrared radiation on dehydration of carrot slices [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 350–359. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210139&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.039. (in Chinese)
- [20] LIESBETH V, IESEL V P, TARA G, et al. Thermal versus high pressure processing of carrots: a comparative pilot-scale study on equivalent basis[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 15:1–13.
- [21] 丁真真,陈计峦,张超,等. 干燥介质对脱水胡萝卜特性的影响[J]. 食品科学,2017,38(13): 96–101.
- DING Zhenzhen, CHEN Jiluan, ZHANG Chao, et al. Effect of drying media on the quality of dehydrated carrots[J]. Food Science, 2017,38(13): 96–101. (in Chinese)
- [22] 姚正晓,刘慧娟,陈林,等. 美拉德反应及其在食品工业中的应用[J]. 广州城市职业学院学报, 2012, 6(1): 47–52.
- YAO Zhengxiao, LIU Huijuan, CHEN Lin, et al. Maillard reaction and its application in food industry [J]. Journal of Guangzhou City Polytechnic, 2012, 6(1): 47–52. (in Chinese)
- [23] 傅兴仁,梁煦宏,揭瑞瑶,等. 纸张定量、水分的连续测量(二)[J]. 中国造纸, 1983(5):35–39,11.
- FU Xingren, LIANG Xuhong, JIE Ruiyao, et al. Continuous monitoring of basis weight and moisture content of paper (II) [J]. China Pulp & Paper, 1983(5): 35–39,11. (in Chinese)
- [24] 王亚伟. 光散射理论及其应用技术[M]. 北京:科学出版社, 2013:40–41.
- [25] 宋贵才,全薇,宦克为,等. 红外物理学[M]. 北京:清华大学出版社, 2018:37–125.
- [26] 孙国正,孙强,任智斌. 基于 Mie 散射理论的微球体颗粒半径分析[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 495–498.
- SUN Guozheng, SUN Qiang, REN Zhibin. Analysis of the radius of microsphere particles based on Mie scattering theory[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 495–498. (in Chinese)
- [27] 项建胜,何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法[J]. 应用光学, 2007, 28(3): 363–366.
- XIANG Jiansheng, HE Junhua. Numerical calculation of Mie theory[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(3): 363–366. (in Chinese)
- [28] 孙昕,张贵忠,贾光明,等. 基于米氏散射理论的激光粒度仪的介绍[J]. 现代科学仪器, 2004(5): 40–42.
- SUN Xin, ZHANG Guizhong, JIA Guangming, et al. Study of laser sizers based on Mie scattering theory [J]. Modern Scientific Instruments,2004(5): 40–42. (in Chinese)
- [29] 贺应红,郑玉臣,程娟,等. 米氏散射激光雷达近场距离校正函数曲线拟合法修正[J]. 光学学报, 2005, 25(3): 289–292.
- HE Yinghong, ZHENG Yuchen, CHENG Juan, et al. The correction of short-range laser lidar returns with fitting to lidar range-adjusted power[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(3): 289–292. (in Chinese)
- [30] 王相友,张海鹏,张丽丽,等. 胡萝卜切片红外干燥特性与数学模型[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 198–202.
- WANG Xiangyou, ZHANG Haipeng, ZHANG Lili, et al. Infrared radiation drying characteristics and cathematical model for carrot slices[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 198–202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131032&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.032. (in Chinese)
- [31] 程广壮,朱翠凤,张美婷,等. 狭缝中蒸发水分子的红外吸收光谱[J]. 发光学报, 2020, 41(1): 110–116.
- CHENG Guangzhuang, ZHU Cuifeng, ZHANG Meiting, et al. Infrared absorption spectrum of evaporated water molecules in slit[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(1): 110–116. (in Chinese)
- [32] FUKASAWA T, SATO T, WATANABE J, et al. Relation between dielectric and low-frequency Raman spectra of hydrogen-bond liquids[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(19):197802.
- [33] HUNT N T, KATTNER L, SHANKS R P, et al. The dynamics of water-protein interaction studied by ultrafast optical kerr-effect spectroscopy[J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, 129(11):3168–3172.
- [34] 张建平,赵林,谭欣. 改变水分子簇的结构及诱发的生物效应研究[J]. 天津理工学院学报, 2003,19(4): 8–12.
- ZHANG Jianping, ZHAO Lin, TAN Xin. Progress in changing the structure of water clusters and the corresponding biological effects [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2003,19(4): 8–12. (in Chinese)

- [35] 庞小峰. 生命体吸收的红外光的非热生物效应的研究[J]. 物理, 2001, 30(9): 525 – 532.
PANG Xiaofeng. Non-thermal biological effect of infrared light absorbed by living systems[J]. Physics, 2001, 30(9): 525 – 532. (in Chinese)
- [36] LI S, AZIZI A, KIRK S R, et al. An explanation of the unusual strength of the hydrogen bond in small water clusters[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2020, 120(19): e26361.
- [37] STAROWICZ M, ZIELINSKI H. How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? [J]. Food Reviews International, 2019, 35(8): 707 – 725.
- [38] 祁岩龙, 冯怀章, 于洋, 等. 美拉德反应研究进展及在食品工业中的应用[J]. 食品工业, 2018, 39(3): 248 – 252.
QI Yanlong, FENG Huaizhang, YU Yang, et al. Progress and application of Maillard reaction in food industry[J]. The Food Industry, 2018, 39(3): 248 – 252. (in Chinese)
- [39] 胡燕, 陈忠杰, 李斌. 美拉德反应产物的功能特性和安全性研究进展[J]. 食品工业, 2016, 37(10): 258 – 262.
HU Yan, CHEN Zhongjie, LI Bin. Progress of functional properties and safety of Maillard reaction products[J]. The Food Industry, 2016, 37(10): 258 – 262. (in Chinese)
- [40] 吴相钰, 陈守良, 葛明德. 陈阅增普通生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 221 – 227.
- [41] CHO A. To physicists' surprise, a light touch sets tiny objects aquiver[J]. Science, 2005, 309 (5733): 366.
- [42] 徐昕, 金雪莹, 高浩然, 等. 耦合光学微腔的频率调谐过程分析[J]. 物理学报, 2020, 69(18): 251 – 258.
XU Xin, JIN Xueying, GAO Haoran, et al. Analysis of frequency tuning process of dual coupled optical microcavities[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(18): 251 – 258. (in Chinese)
- [43] 许飞, 朱江转, 高云静, 等. 蔗糖溶液折射率与浓度关系的理论和实验探究[J]. 大学物理, 2020, 39(1): 45 – 47, 56.
XU Fei, ZHU Jiangzhuang, GAO Yunjing, et al. Theoretical and experimental study of the relation between refractive index and concentration of sucrose solution[J]. College Physics, 2020, 39(1): 45 – 47, 56. (in Chinese)
- [44] ALI A, BIDHURI P, MALIK N A, et al. Density, viscosity, and refractive index of mono-, di-, and tri-saccharides in aqueous glycine solutions at different temperatures[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(7): 1684 – 1694.

(上接第 318 页)

- [29] 韩光明, 陈全求, 张淑芳, 等. 生物炭对不同连作年限棉田土壤微生物数量的影响[J]. 棉花科学, 2017, 39(5): 7 – 12.
HAN Guangming, CHEN Quanqiu, ZHANG Shufang, et al. Effects of biochar on soil microbial population in cotton fields with different continuous cropping years [J]. Cotton Sciences, 2017, 39(5): 7 – 12. (in Chinese)
- [30] 王荣梅, 杨放, 许亮, 等. 生物炭在新疆棉田的应用效果研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(6): 757 – 763.
WANG Rongmei, YANG Fang, XU Liang, et al. The effects of biochar application in the cotton fields of Kashgar oasis, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. Earth and Environment, 2014, 42(6): 757 – 763. (in Chinese)
- [31] 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 137 – 142.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137 – 142. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140122&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022. (in Chinese)
- [32] 李凤霞, 郭永忠, 王学琴, 等. 不同改良措施对宁夏盐碱地土壤微生物及苜蓿生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(30): 49 – 55.
LI Fengxia, GUO Yongzhong, WANG Xueqin, et al. Effect of different soil improvement measures on microbial diversity and alfalfa biomass in saline alkali soil in Ningxia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(30): 49 – 55. (in Chinese)
- [33] 隋虹杰, 成慧娟, 王立新, 等. 不同覆膜方式对高粱生长发育和土壤微生物的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 133 – 138.
SUI Hongjie, CHENG Huijuan, WANG Lixin, et al. Influences of different mulching methods on sorghum growth and soil microorganism[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(15): 133 – 138. (in Chinese)
- [34] 沈鹏飞. 不同覆盖措施对渭北苹果园土壤理化性质及微生物群落结构的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
SHEN Pengfei. Effects of different mulching measures on soil physical and chemical properties, microbial community characteristics in Weibei apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [35] 时唯伟, 支月娥, 王景, 等. 土壤次生盐渍化与微生物数量及土壤理化性质研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 166 – 170.
SHI Weiwei, ZHI Yuee, WANG Jing, et al. Secondary salinization of greenhouse soil and its effects on microbe number and soil physico-chemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 166 – 170. (in Chinese)
- [36] IBEKWE A M, POSS J A, GRATAN S R, et al. Bacterial diversity in cucumber (*Cucumis sativus*) rhizosphere in response to salinity, soil pH, and boron[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(4): 567 – 575.
- [37] 罗安程, 孙羲. 施肥对红壤中微生物区系和无机磷溶解及有机磷矿化的影响[J]. 土壤通报, 1995(2): 73 – 75.
LUO Ancheng, SUN Xi. Effects of fertilization on microflora, dissolution of inorganic phosphorus and mineralization of organic phosphorus in red soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995(2): 73 – 75. (in Chinese)