

湿的粗糙表面颜色变深的机理探究

洪叶瀚，季灵晶，钱鼎文，沈弘毅

指导老师：陈唯，杨中芹

摘要

本实验探究了影响干沙（布）与湿沙（布）的深浅的可能因素：观测角、液体介质的折射率、液体的量、沙的颜色等等，提出以全反射为基础的理论，并与实验事实比较，同时提出进一步研究的方向

引言

衣服变湿后往往颜色变深，这是日常生活中常见的情景，该现象背后隐藏着丰富的物理原理。本实验以沙子为研究对象，试图探究影响干沙与湿沙颜色深浅变化的因素，并建立简单模型定量分析干湿沙颜色深浅。

理论模型

对于湿布（沙）颜色变深的原因，我们提出以下模型，包含以下假设：

1. 覆盖在沙子表面的液体介质厚度小，且清澈透明，故可以忽略液体对光的吸收
2. 假设沙子表面足够粗糙，光在沙子表面的漫反射是各向同性的（这一点在之后开展的实验中可得到佐证），且表面是否覆盖液体不影响沙子反射光的角度、大小分布，同时沙子对光的吸收与角度无关。也就是说，若照射在沙子上的所有光能为 I ，则沙子吸收的光能为 aI ，剩下的 $(1-a)I$ 被均匀地散布在沙层以上的空气空间
3. 假设湿沙表面的液体层在小范围内近似是一个平面，从而沙子表面的反射光只有在液体-空气界面上的入射角小于全反射临界角 i_c 时才能进入空气
4. 由于沙粒数量大且表面粗糙，假设能够穿出液体射入空气的光的强度也是各向同性的。现在考虑水-气界面的一次全反射。从沙子反射后经过水射向空气的光，只有入射角限制在 $i < i_c$ 这个锥体内的光才能有部分透射进入空气。

设光线从水射向空气， i_1 为入射角， i_2 为折射角。 p 光复振幅反射率为

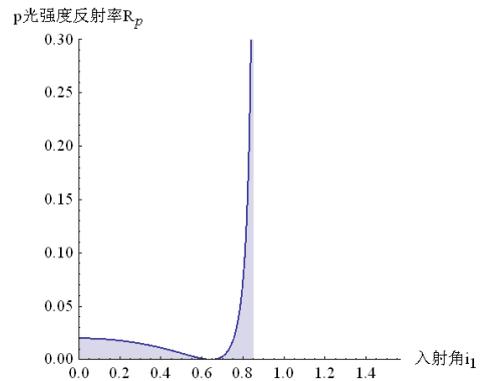
$$r_p = \frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \quad (1)$$

$$\text{有 } n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (2)$$

$$\text{光强反射率 } R_p = r_p^2 \quad (3)$$

能流反射率等于光强反射率，而能流透射率等于 $t=1-R$ 。对于不同入射角，能流透射率不同，可以积分取平均得总透射率。

$$T = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{i_c} \tau(i_1) \sin i_1 di_1 d\phi}{2\pi} \quad (4)$$



实际上，从光源出射的是自然光，电矢量振动方向各向同性，可认为 p 光和 s 光等强度，故总反射率

$$R = \frac{0.5 R_p + 0.5 R_s}{0.5 + 0.5} \quad (5)$$

由(1)、(3)式可知 T 与 n_1, n_2 有关，故改变折射率会引起明暗变化。

实验器材

细沙（白，蓝，绿，红），表面皿，CCD 相机 GE680，自来水，针筒（1mL），铁架台，纸杯，大豆油，粗砂，强白光源及电源，三角架，蓝色牛仔布，硬纸板，支撑架，细线，金属饼干盒，电烙铁，长方体透明容器

软件 mathematica, PvAPI_win_1.28

实验步骤及过程

1. 用显微镜观察干、湿的布和沙子

2. 研究观测角的影响

1). 调节相机光轴基本与桌面垂直。将干布与用水浸湿的布（以下无特殊说明时湿布、湿沙指水浸湿的沙子）粘在硬纸板上固定在三角架的顶部，调节三角架使布面水平。自然光下，改变三角架顶面与水平面的夹角，相机拍照并分析图像中布的灰度值。夹角通过一根重锤线与顶面夹角的改变测得。

2). 将圆形饼干盒侧立放置，暗室中强白光源水平照射，基本照亮饼干盒的上半面。在盒子的迎光面（即 $1/4$ 的圆周）并排铺上干、湿布。相机固定在盒子上方竖直向下拍摄。用 mathematica 处理图像灰度。

3. 研究介质（水，酒精，油）的影响

1). 取两个表面皿（或两个半圆形表面皿），均盛有干的白沙约 2~3mm 深。向其中一个表面皿中加入水使得沙表面全部润湿而尚未形成明显的水层。相机固定在盒子上方竖直向下拍摄。用 mathematica 处理图像灰度。

2). 分别将水换成油、酒精，重复 1 的操作

4. 研究沙的颜色的影响

1). 取两个表面皿（或两个半圆形表面皿），均盛有干的白沙约 2~3mm 深。向其中一个表面皿中加入水使得沙表面全部润湿而尚未形成明显的水层。相机固定在盒子上方竖直向下拍摄。用 mathematica 处理图像灰度。

2). 分别换用绿沙、红沙、蓝沙，重复 1 的操作

3). 将水换成油，重复 1 和 2 的操作

5. 研究水、酒精的量的影响

1). 取两个表面皿，分别称量两个表面皿的质量

2). 向表面皿中加入约几 mm 深的干的白沙，分别称量两个盛有沙子的表面皿的质量。

3). 向其中一个表面皿中用针筒加入酒精，相机固定在盒子上方竖直向下拍摄。在拍照前、拍照后分别测量含酒精的表面皿的质量。

4). 重复 3 的步骤，直到液体浸没沙子并形成一定深度

5). 将酒精换成水，重复 3 和 4 的步骤

6). 用 mathematica 处理图像

实验结果及分析

本实验应用 CCD 相机拍摄图像，用 Mathematica 分析拍摄图像的灰度，以灰度代表光强。查阅资料得，CCD 上各像素点积累的电荷与光强、光照时间成正比，经处理将电荷量转变成图像灰度。当图像的亮度适中（即不太暗也不过亮）时灰度基本与接收到的光强成线性关系。Mathematica 得到的灰度在[0,1],本实验得到的数据基本上在 0.4-0.8 之间故基本可以灰度代替光强做定量分析。

1. 显微镜下观察干、湿布与沙子

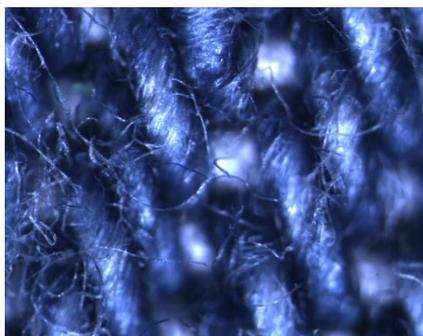


图 1.干牛仔布表面图

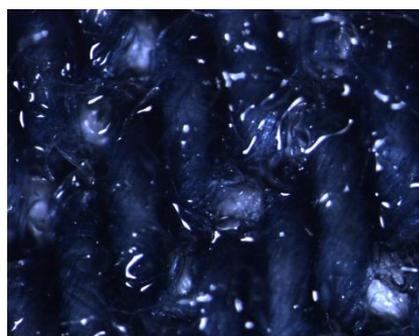


图 2.湿牛仔布表面

在此之前，我们先用显微镜观察了牛仔布的表面，看到许多立着的细毛，加水后细毛纷纷躺倒，有一部分遮住了织物的空隙。这无疑使“湿布变深”的机理更加复杂。因此，我们将实验材料换成了表面结构相对简单的沙砾。

2. 研究角度对反射率的影响。

我们粗测了观察角度，发现灰度比波动很大，考虑到环境光强对 CCD 采集照片的影响，可认为在沙子表面的漫反射没有特定的光强极值方向，故在模型中采取了漫反射各向同性的假设。由于沾了油的布比沾了水的布“看起来更深”，在接下来的实验中我们把注意力集中到了浸湿所用液体的折射率变化对反射率的影响上。

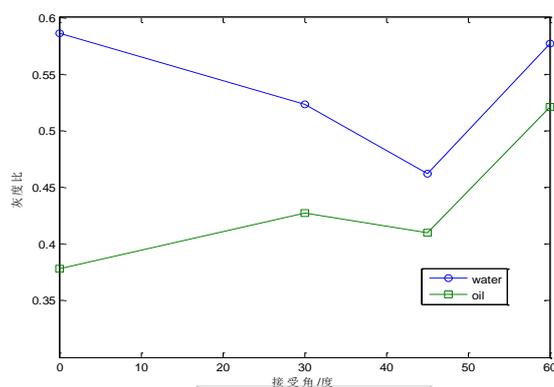


图 3.干湿布的灰度比与观察角度的关系

3. 沙子颜色对湿沙反射率的影响

由于无法得知沙子颜色的确切波长，选择了红绿蓝三色光的典型波长作为参考。从下图可知在光强一定时，灰度比随反射光波长的变大而变大，即“湿的蓝沙看起来要比湿的红沙更深”。但是我们并不因此而认为湿沙的光强反射率与光的波长有紧密的联系（5 中有详细

说明); 一种更合理的解释是人眼对不同色光的反应灵敏度是不同的(CCD 同理),这牵涉到有关颜色和成像理论的知识, 在之后的实验中会加以研究。

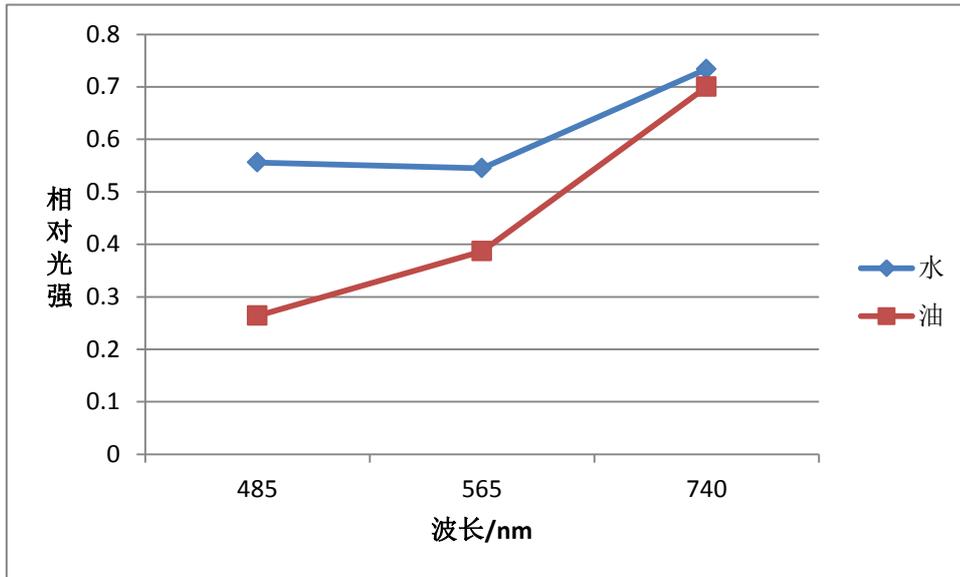


图 4.水、油浸润下的湿沙相对于干沙的反射光的相对光强与光的波长的关系图

基于以上分析, 白沙可以排除颜色的影响因素。

4.不同液体对白色湿沙子反射率的影响

水的折射率取 1.33, 75%酒精(室温下)的折射率取 1.36, 色拉油的折射率取 1.47; 实际测量过程中改变了液体的量, 但变化不明显(灰度比相差 2%), 故灰度比均取平均值。

作图后发现湿沙反射率随介质折射率的变大而变小, 与全反射模型预言的趋势一致; 但是实验结果与理论值在数值上相差很大。这主要是由于模型只考虑了一次全反射, 可以加上在介质内的多次反射来修正结果。

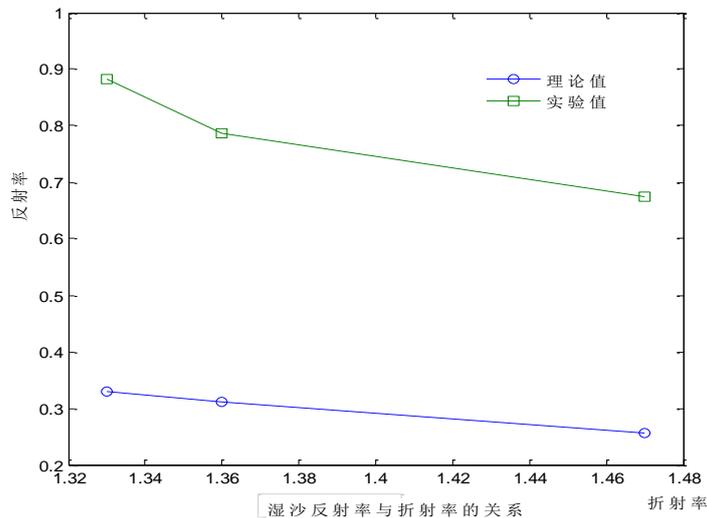


图 5.湿沙反射率与折射率的关系

5.对于湿布反射光光谱的测量

虽然反射率与波长相关, 但水的折射率随波长变化不大(约为 1.33); 若单纯的用全反射模型解释应无如此大差异。用显微镜观察到绿沙其实是透明的, 像绿玻璃一样; 黄沙也如此。我们提出以下猜想: 板之所以显蓝色是因为它吸收除蓝光以外所有可见光频率的光。当光打到板上时, 在玻璃表面光与蓝玻璃相互作用, 蓝光未被吸收而是反射出来, 这相当一级

作用，即还有一些其他的光未被充分吸收，混在反射光里，只不过被蓝光强烈地遮掩了；但透射光实际在蓝玻璃内部由于反复反射，其他频率的光基本被吸收，所以透射光更蓝。

湿的蓝沙也符合以上分析。水的包裹使光被许多次地反射（不一定是全反射），从而除蓝光以外的光被更多的吸收，故湿沙可能实际是更蓝而不是更暗。同理，对蓝布而言，湿布比干布显得更蓝，而不是更暗。

为了验证以上假设，我们请一家公司用光谱仪对干湿布的反射光频谱进行了测量，结果如图 6 所示：

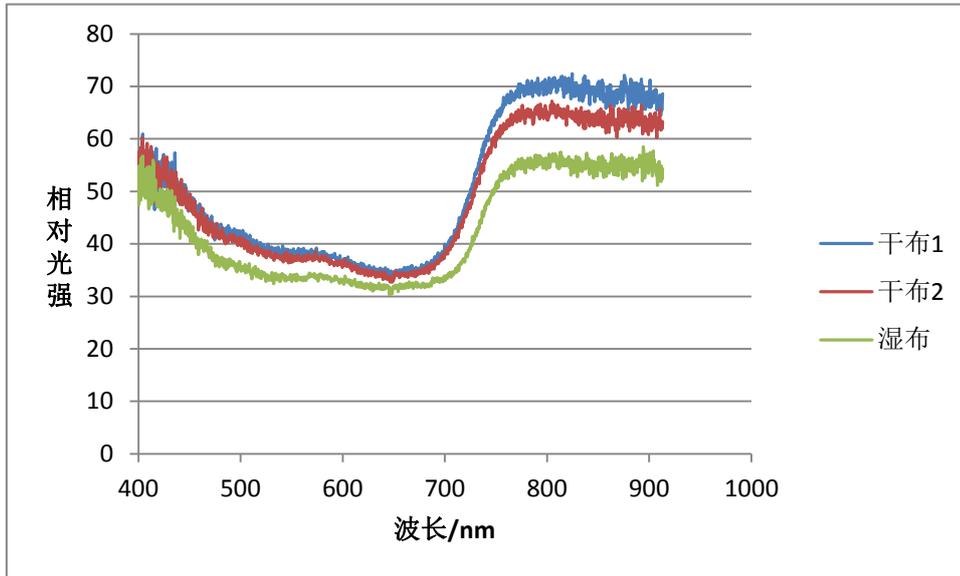


图 6.干湿布的反射光频谱分布图

上图中“干布 1、干布 2、湿布”分别代表两块干的蓝色牛仔布和一块湿的蓝牛仔布的反射光频谱，从图像中可以看出，干湿布的反射光频谱图形状基本相同仅高度有差异。为了更准确地表明干湿布的反射光谱差异，我们将对应波长的干湿布反射光光强比算出并作图，如图 7

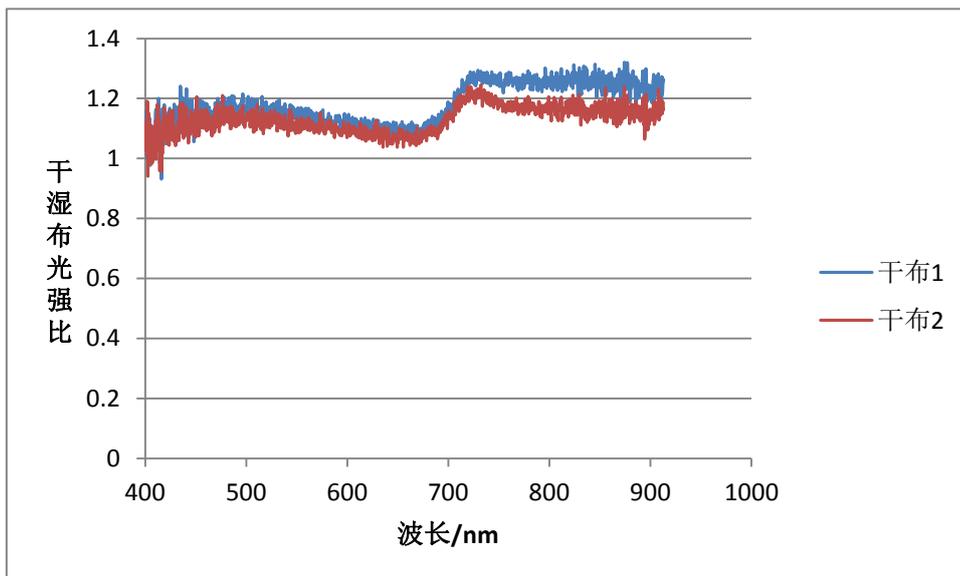


图 7.干湿布的反射光相对光强比与波长关系图

从图 7 中可以看出干湿布的反射光相对光强比随波长变化不大，基本在 1.2 左右。故波长对反射光强的影响并不大，可以忽略。

实验结论

在一定光强下，介质的折射率越大，湿沙的反射率越小，即看起来更暗；用全反射模型可以初步解释该现象。

参考文献

- [1] 钟锡华，现代光学基础，北京大学出版社，2003
- [2] Hecht, Optics, 高等教育出版社，2005
- [3] H.B.Mall Jr and N.da Vitoria Lobo. Determining wet surfaces from dry. IEEE Proc. 5th Intl Conf on Computer Vision, 963-968 (1995)
- [4] J. Lekner and M. C. Dorf. Why some things are darker when wet. Appl. Optics 27, 7, 1278-1280 (1988)