

利用染色示踪和图像处理技术对土壤大孔隙进行定量研究

邱 琳, 吴华山, 陈效民, 潘剑君*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 以太湖地区水稻土为例介绍了染色示踪和图像处理技术在土壤大孔隙定量化研究中的应用。剖面染色的区域是孔隙存在的地方, 孔隙的孔径越大, 充斥的染料溶液就越多, 所染的颜色就越深。据此利用地理信息系统软件 ArcGIS 和遥感图像处理软件 ERDAS 对土壤剖面图像进行处理并进行颜色分级。从分级结果中提取代表土壤大孔隙的部分, 计算大孔隙的含量。所得结果与土壤各层次的孔隙度、黏粒含量、饱和导水率变化趋势有很好的一致性。并且本文还对染色示踪法土壤孔隙定量的影响因素进行讨论。

关键词: 土壤大孔隙; 染色示踪; 图像处理

中图分类号: S152

土壤大孔隙是土壤中水分和空气的主要通道, 它的存在可以导致土壤优先水流和溶质优先迁移的产生, 是水分和化学物质快速、远距离运移的主要甚至可能是唯一的途径^[1]。土壤大孔隙的定义和测定是研究土壤大孔隙的前提, 但是目前国内对其还没有统一的定义。研究中不能只单纯地考虑孔隙大小因素, 而应与孔隙的功能结合起来。因此, 笔者认为刘伟等给出的土壤大孔隙定义比较适合, 即: 不论孔隙大小、形状如何, 能够提供优先水流路径的任何孔隙都可称之为大孔隙。大孔隙的测定目前有直接测定法和间接描述法, 采用直接测定法更符合大孔隙的定义。直接测定方法包括目视观测法、图像处理法以及 X 射线层析扫描摄像法(CT 扫描法)等。目视观测法由于人眼观察能力的限制, 准确性较差, 已不太常用。CT 扫描法, 虽然是一种非破坏性的测定技术, 并且可以观测土壤的三维结构, 但是其费用非常昂贵^[3-4]。图像处理法是目前常用的一种方法, 根据对土样前处理方式的不同, 分为切片法和染色示踪法。切片法是从野外采回原状土, 将其用树脂等物质浸泡, 等固结后将土壤制成薄片, 用扫描仪或电子显微镜等仪器获取数字图像并进行处理分析^[5-8]。染色示踪法是直接在野外或实验室将染色剂采用喷淋、浇灌等方式对土壤进行染色, 利用数码相机对土壤剖面进行拍照, 对所获得的数字图像进行处理分析^[9-10]。切片法获得的图像分辨率相对较高, 测得的孔隙数量比较准确, 但高分辨率的代价必然要使研究区域变小, 缺乏代表性, 所测得结果并

不能实际反映优先流流经的大孔隙数量, 因此更适合对大孔隙进行定性测定。而且由于树脂本身具有黏滞性, 一些大孔隙不能被浸入^[5]。染色示踪法所获得的图像分辨率虽然相对较低, 但是其研究区域较大, 所测定的孔隙更符合大孔隙的定义, 并且比切片法省时省力得多, 程竹华等^[11]在国内首次利用该方法对田间土壤中的优势流进行研究。但目前国内对于染色示踪法测定土壤大孔隙的报道还比较少, 所以本研究选择太湖地区水稻土, 采用此方法对其进行大孔隙测定, 并讨论影响这种方法测定结果的因素。

1 材料与方法

1.1 供试土样

选择了太湖地区 3 种主要的水稻土, 分别是宜兴的白土、常熟王庄的黄泥土和常熟辛庄的乌棚土。

1.2 田间染色方法与步骤

1.2.1 染色示踪剂的选择 染色示踪剂选用显色效果好, 且无毒无害的 3 kg/m^3 的亮蓝溶液。亮蓝是一种食品添加剂, 为带有金属光泽的红紫色颗粒或粉末, 无嗅。溶于水时呈蓝色, 显色性极强。在 $\text{pH} > 5.83$ 时呈阴离子状态, 不易被土壤颗粒所吸附^[12]。

1.2.2 田间土壤染色及图像拍摄操作步骤 在每种类型的土壤上建立一个 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的试验小区, 小区均用长为 1.5 m , 高度不少于 0.3 m 的 PVC 板围起。PVC 板钉入地下 20 cm , 可以在一定程度上防止测渗。将 225 kg 浓度为 3 kg/m^3 (相对于小区来说即 100 mm

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371055)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20030307018)资助。

* 通讯作者 (jpan@njau.edu.cn)

作者简介: 邱琳(1981—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统应用与开发研究。E-mail: qilin_81@student@sina.com

深的亮蓝溶液)灌入小区,对土壤进行染色。

染色1天之后开挖 $1\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 竖直剖面,每小区4个(相邻剖面间隔20cm)。所挖剖面应尽可能趋向小区的中心,而且尽量竖直。用4根平直的铝合金条将 $1\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 剖面区域围起来,用数码相机对剖面进行拍照,相机分辨率设置为 1344×1024 。

1.3 室内图像处理

利用ERDAS 8.5和ArcGIS 8.1软件对图像进行处理分析。这两款软件是由ESRI公司推出的、功能强大的遥感图像处理软件和地理信息系统软件^[13-14]。ERDAS对栅格图像的处理具有优势,而ArcGIS对矢量图形的处理分析较强。本实验用到其中的几何校正,图像假彩色合成、掩膜、分类,矢量图形叠加分析等功能。

1.3.1 图像的几何校正 数码相机拍摄的图像会有一定的几何变形,需要进行几何校正。即将图像中铝合金条围起区域的4个顶点作为参照点,赋给这4个点与土壤剖面相对应的坐标,单位mm,即水平方向上相距1000mm,竖直方向上相距800mm,然后进行重采样,完成几何校正。此过程包含了坐标转换,原始图像坐标为像元的行列数,经过几何校正后,转换为与土壤剖面相对应的长度坐标。

重采样时需要确定图像像元的大小。本实验降低了原始图像的分辨率,设置的像元边长代表土壤剖面实际长度为1mm(原始图像为0.78mm),也就说明所识别的最小孔径为1mm。目前对于大孔隙孔径大小的划分,观点不尽相同。具体的孔径指标由于毛管势的大小、孔隙功能、水动力学特征和图象处理的精度而划分的标准不同^[15]。黄昌勇^[16]认为大孔隙(通气孔隙或非毛管孔隙)孔径应 $>0.1\text{ mm}$ 。刘伟^[2]认为大孔隙孔径应 $>0.03\text{ mm}$ 。Panini和Pagliai等^[17-18]将孔径 $>50\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙看做大孔隙。Kulli等^[9]和Forrer等^[19]认为孔径 $>1\text{ mm}$ 为大孔隙。本实验为文献[1]的后续研究,为了与其对照,所以设置像元边长大小代表土壤剖面实际长度1mm。

1.3.2 图像的假彩色合成 原始图像为24位RGB三通道图像,将其进行假彩色合成处理,即改变通道的颜色,而不改变图像的灰度值,例如将绿色赋给红色的通道。合成后的RGB图像颜色虽然与真实情况不同,但可使染色区域突出的显示,便于观察。如图1所示,a为数码相机拍摄的原始图像,b为假彩色合成后的图像。可以看到,染色区域被清晰地反映出来,这为分类模版的制作提供了清晰的图像。



图1 原始图像(a)与假彩色图像(b)的对比

Fig. 1 Comparison between original image(a) and false color image(b)

1.3.3 图像的掩膜 溶液是通过孔隙流动的,所以剖面染色的地方就是孔隙存在的地方。土壤中孔隙的大小相差很大,孔隙越大,充斥的亮蓝溶液就越多,所染的蓝色就越深。据此对图像中染色部分进行颜色分级,以确定不同大小孔隙在剖面中的数量。但未染色的部分会对分级产生影响,如刻痕(图1a中椭圆所示)、土壤包含物(图1a中箭头所示)等。所以要对图像进行掩膜操作,即将未染色的部分去掉或使其变为同一颜色。方法步骤为:利用假彩色合成图像建立

分类模版。在染色区域采样时要将深浅颜色都采到,在非染色区采样时要包括对分类影响较大的要素。利用建立的分类模版对假彩色图像进行监督分类,分为两级,即得到掩膜文件。利用掩膜文件对原始图像进行掩膜,去掉非染色部分。

1.3.4 图像的非监督分类 对图像分类的目的有两个:对染色区域蓝色进行分级,确定不同级别孔隙的数量。提取大孔隙。由于本试验是对非饱和土壤染色,所以较细小的孔隙会对亮蓝溶液产生吸持,导

致这部分孔隙也被染色。经过颜色分级后，可以剔除细小孔隙，得到大孔隙的数量。

将掩膜后的图像进行分类。一般来说监督分类要比非监督分类的精度高，但是监督分类必须要制作分类模版才可以进行。由于肉眼的限制，不能对渐变的蓝色进行分等定级，无法制作分类模版，所以本试验采用非监督分类。颜色共被分为10级，1代表最深，10代表最浅。图2为完成分类的专题图，0代表未染色部分。



图2 土壤孔隙分级图

Fig. 2 Classification map of soil pores

1.4 土壤孔隙数量的计算

本研究期望确定不同剖面层次的大小孔隙数量，然而，经过非监督分类的栅格图像并不含有剖面层次的信息。解决的办法是：将土壤剖面孔隙分级图(图2)转换为矢量数据。根据文献[1]中划分的土壤发生层次绘制剖面层次矢量图形(图3，以白土为例)。将孔隙分级矢量数据与剖面层次矢量数据进行叠加分析，即得到最后的结果图。利用此图的属性表信息可以统计不同染色级别的面积，进而计算出其占剖面层次的面积百分比，即这一级别孔隙的比例。

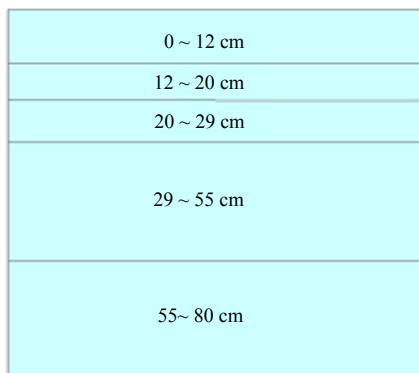


图3 土壤发生层矢量图

Fig. 3 Vector map of pedogenesis layers

2 结果与讨论

2.1 染色示踪法土壤孔隙定量结果及其评价

目前对于大孔隙的测定还没有公认的方法，试验选取的方法不同，得到的结果也就不同。本试验以黄泥土为例，利用土壤的基本性质评价这种方法得到的结果，并与通过土壤水分特征曲线判别的大孔隙数量进行比较。

图4为各级孔隙的百分比，从1到10级蓝色逐渐变浅。因为剖面各发生层次的高度是不同的，为了分析需要，分别将每一层的数据除以这一层的高度(单位cm)，所得结果为每厘米高度各级别孔隙所占的比例(图5)。1~4级被认为是不同级别大孔隙的比例，5~10级不被包含在大孔隙范围内(其依据在后面讨论)。

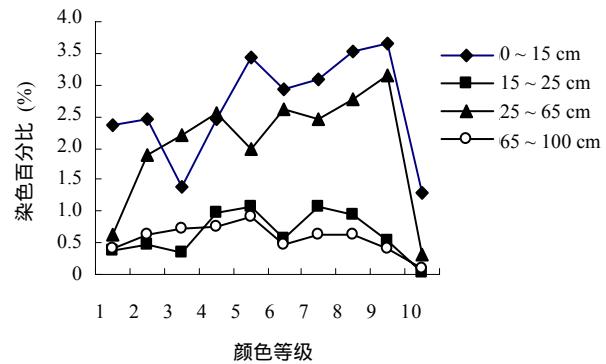


图4 各级土壤孔隙比例

Fig. 4 Soil pore percentage of soils of various classes

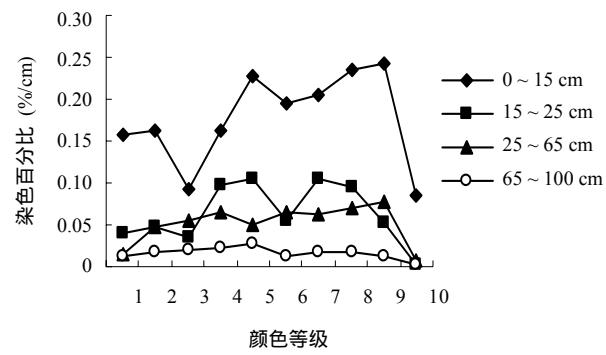


图5 每厘米高度各级土壤孔隙比例

Fig. 5 Soil pore percentage per centimetre thick of soil layer in soil profiles of various classes

因为大孔隙占饱和水运动通道的大多数^[14]，所以大孔隙数量多，饱和导水率就高。图5中大孔隙的比例(1~4级的总和)从表层到下层依次减少。与测得的土壤饱和导水率(表1)进行比较发现，前3层饱和导

水率也为降低趋势，但在第4层大孔隙比例继续减少，而饱和导水率升高了。在挖掘剖面的过程中，发现颜色最深染到剖面80 cm处，而第4层大孔隙比例是按100 cm（与文献[1]相对照）计算的，所以第4层的结果并不能反映真实的情况。对于剖面上3层，还可看出这样的趋势，从上到下各层大孔隙比例的减少是与孔隙度的减少和体积质量（容重）及黏粒含量的增加是对应的，这与文献[1]所得到的结论是一致的。

从图5可以看出，表层土各级别孔隙的比例都很大，这与实际情况相符合。因为土壤表层为耕层，有机质含量较高，经常受到耕种，并且受植物根系的穿插，所以表土层比较疏松，结构良好，各级孔隙比例较大。在表1中看到土壤第3层的饱和导水率非常小，

这与该层黏粒含量较高有关，因为黏粒含量的增加导致细小孔隙的增加，所以饱和导水率会下降。图5剖面第3层数据也反映了细小孔隙数量增加这一趋势，与实际情况符合。

通过与土壤水分特征曲线判别所得结果相比较（表2），发现3种土壤用染色示踪法得到的大孔隙数量更大。刘伟等^[2]认为通过土壤水分特征曲线判别土壤大孔隙的数量属于间接描述法，它测得的是“瓶颈”的大小，即最小孔隙的含量，其值小于直接测定（在这里指染色示踪法）的结果。表2的结果与刘伟等^[2]的论述一致。

综上所述，利用染色示踪法测得的大孔隙数量与实际情况比较吻合。

表1 黄泥土的基本性质^[1]

Table 1 Basic properties of Huangni Soil

土壤层次 (cm)	砂粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	体积质量 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	饱和导水率 (×10 ⁻⁵ cm/s)
0~15	298.6	390.7	301.7	1.12	57.74	2.07
15~25	301.1	399.7	299.2	1.23	53.58	1.33
25~65	203.9	350.4	445.7	1.42	46.42	0.14
65~100	271.1	379.5	349.4	1.39	47.55	0.80

表2 两种测定土壤大孔隙方法的结果比较

Table 2 Results of the two methods for determination of soil macropores

白土			黄泥土			乌棚土		
土层(cm)	方法1(%)	方法2(%)	土层(cm)	方法1(%)	方法2(%)	土层(cm)	方法1(%)	方法2(%)
0~12	3.75	9.35	0~15	8.64	8.63	0~15	8.54	22.54
12~20	3.20	8.25	15~25	4.51	2.19	15~28	4.06	4.26
20~29	2.31	9.13	25~65	3.67	7.28	28~42	2.34	5.72
29~55	2.33	20.33	65~100	3.11	2.49	42~70	2.18	8.40
55~100	1.09	8.61	-	-	-	-	-	-

方法1：通过土壤水分特征曲线所判别出来的大孔隙含量（结果来自文献[1]）；方法2：通过染色示踪法计算出来的大孔隙的含量。

2.2 染色示踪法土壤孔隙定量的影响因素

2.2.1 剖面的挖掘 在剖面的挖掘过程中，剖面的竖直程度和平滑程度会影响最终结果，应注意：所挖剖面要尽量地竖直，否则会导致图像变形更加严重。

所挖剖面应尽可能平滑，否则剖面的粗糙会产生微小的阴影，这些阴影加深了图像颜色，在图像处理时会产生误差。

2.2.2 图像的拍摄 相机镜头与剖面的垂直程度、距离，成像分辨率，图像保存的文件格式等会影响最

终的结果。应注意：相机的镜头要垂直正对剖面中心，保证所拍图像变形较小。在将剖面全部范围拍摄的情况下，尽量缩短镜头与剖面之间的距离，这样可以提高图像的清晰度。相机的分辨率要尽量设置得高一些。在存储容量和图像处理速度的允许下，分辨率越高，观察到的孔隙就越细，Forrer 等^[19]已经将分辨率设置为3072×2048。图像格式应保存为TIFF文件格式。它的特点是图像的非失真压缩。而一般拍照时常用的JPEG格式不适用，虽然其所占的存储空

间较小，但是图像信息损失较多。

2.2.3 图像处理时不同的图像分辨率 因为在几何校正重采样的过程中图像的分辨率被降低了，所以需要讨论分辨率的降低对最终结果的影响。以黄泥土第3剖面层次为例，在重采样时图像的分辨率被降低，像元边长所代表土壤剖面实际长度分别为1 mm、1.2 mm、1.4 mm，结果见图6。随着分辨率的降低，8~9级孔隙受影响最大，5~7级所受影响相对较小，但也有稍许波动，1~4级基本上没有受到影响。这说明在图像处理时，图像分辨率的改变会影响最终的结果。同时也反映了在拍照时，应将图像分辨率设置得高一些，使之更符合实际的情况。

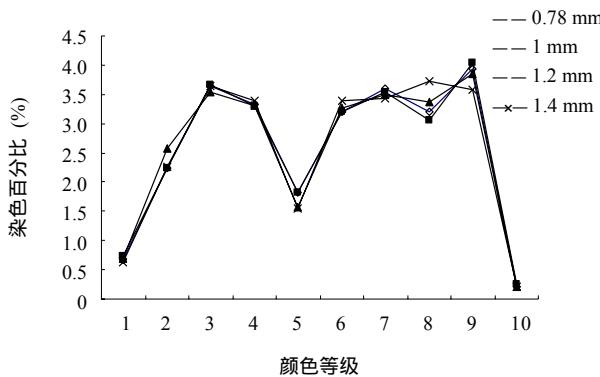


图6 不同图像分辨率得到的各级土壤孔隙比例

Fig. 6 Soil pore percentage of soils of various classes obtained from images different in resolution

据图6，随分辨率的降低，8级孔隙的增加主要是由9级贡献的。这是由于细小的孔隙都是围绕在较大孔隙周围的，而且不会出现强烈的越级现象，即9级孔隙不会围绕在1级附近，它只会围绕在与自己级别相近的孔隙周围，如8级、7级等，但更多的情况还是围绕在最相近的8级孔隙周围，如图7所示（将图2放大，截取其中非常小的一部分得到图7，其中数字代表孔隙级别）。由于9级孔隙要比8级细一些，所以在图像处理时，9级孔隙会并入8级。这说明如果某级别孔隙数量随着分辨率的改变而变化，那么它与级别相近的孔隙数量改变有关，并且变化的幅度相似。据此可以对孔隙进行归类。

根据图6显示的孔隙数量的变化幅度，将8~10级孔隙划为一类，5~7级孔隙划为一类，1~4级孔隙划为一类。由于8~10级孔隙数量的变化幅度较大，5~7级孔隙也有稍许波动，所以认为这两类不属于大孔隙的范围。而只有1~4级的孔隙属于大孔隙，以此作

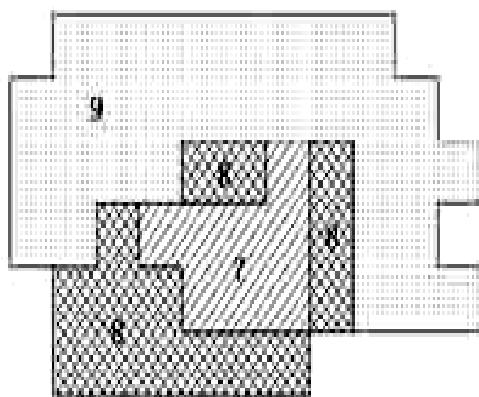


图7 土壤孔隙分布示意图

Fig. 7 Sketch map of soil pore distribution

为划分大孔隙的依据。在图b中可以看出像元边长从0.78 mm变为1 mm时，1~4级孔隙数量基本上没有发生变化。因此，用像元边长1 mm来代替原图像的0.78 mm来反映大孔隙的数量是可行的。

2.2.4 其他影响因素 除上述讨论的因素外，还有一些因素会影响最终土壤大孔隙的定量，如剖面上下层亮度的不同，不同层次土壤背景色的差异等。本次研究没有考虑消除它们造成的影响。对于土壤上下剖面层亮度的不同，可以把图像由RGB色彩空间转换为HSV色彩空间，将图像的V值调整一致，然后再转为RGB色彩空间^[17]。对于不同层次土壤背景色差异的消除，可以利用荧光染色剂进行染色，如果选择合适的激发光源和滤光片，可以很好地解决这个问题^[10]。

3 结语

土壤大孔隙的形成是由生物、物理、化学等诸多因素造成的。它的存在，一方面增加了土壤的通气性，提高了雨水和地表水的渗透性，降低了地表径流，减少了地表侵蚀，促进了根系生长；另一方面会导致降水或灌溉水的浪费、植物所需养分的流失、地下水的污染^[2, 20-22]。所以，非常有必要定量研究土壤中大孔隙的数量、分布等状况，并建立相应优先流迁移模型^[23]。研究利用的染色示踪法对定量研究土壤大孔隙具有很好的适用性，可在田间进行，与实际情况接近，所计算出来的结果也与实际情况比较吻合。而且此方法省时、省力、花费较少，在进行大量样点采集时，这个特性更加突出。但是这个方法也具有局限性，只能进行定量的描述，而不宜进行定性描述，而且图像分析技术与土壤学及土壤物理学实际问题和过程还缺乏有效结合^[5]，所以，应加强这方面的研究。

参考文献：

- [1] 陈效民, 黄德安, 吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究. 土壤学报, 2006, 43 (3): 509-512
- [2] 刘伟, 区自清, 应佩峰. 土壤大孔隙及其研究方法. 应用生态学报, 2001, 12 (3): 465-468
- [3] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布. 水科学进展, 2002, 13 (5): 611-617
- [4] Pires LF, Bacchi OOS, Reichardt K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005, B 229: 443-456
- [5] 李德成, Velde B, 张桃林. 利用土壤的序列数字图像技术研究孔隙小尺度特征. 土壤学报, 2003, 40 (4): 524-528
- [6] Dath A, Baveye P. Dependence of the surface fractal dimension of soil pores on image resolution and magnification. European Journal of Soil Science, 2003, 54: 453-466
- [7] Fox DM, Bryan RB, Fox CA. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. Geoderma, 2004, 120: 109-120
- [8] 胡霞, 蔡强国, 刘连友, 蔡崇法, 李顺江, 朱远达. 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征. 土壤学报, 2005, 42 (3): 504-507
- [9] Kulli B, Gysi M, Flühler H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. Soil & Tillage Research, 2003, 70: 29-40
- [10] Stadler D, Stähli M, Aeby P, Flühler H. Dye tracing and image analysis for quantifying water infiltration into frozen soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 505-516
- [11] 程竹华, 张佳宝, 徐绍辉. 黄淮海平原三种土壤中优势流现象的试验研究. 土壤学报, 1999, 36 (2): 154-161
- [12] Markus F, Flühler H. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. Water Resource Res., 1994, 21: 990-996
- [13] 党安荣, 贾海峰, 易善桢, 刘钊. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [14] 党安荣, 王晓栋, 陈晓峰, 张建宝. ERDAS IMAGINE 遥感图像处理方法. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [15] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响. 生态学报, 2005, 25 (3): 507-512
- [16] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [17] Panini T, Torri D, Pellegrini S, Pagliai M, Sanchis MPS. A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. Catena, 1997, 31: 199-218
- [18] Pagliai M, Raglione M, Panini T. The structure of two alluvial soils in Italy after 10 years of conventional and minimum tillage. Soil & Tillage Research, 1995, 34: 209-223
- [19] Forrer I, Pepritz A, Kasteel R. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. European Journal of Soil Science, 2000, 51: 313-322
- [20] 区自清, 贾良清, 金海燕, 姜霞, 高继红. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响. 土壤学报, 1999, 36 (3): 341-347
- [21] 冯杰, 郝振纯, 陈启慧. 分形理论在土壤大孔隙研究中的应用及其展望. 土壤, 2001, 33 (3): 123-130
- [22] Xu LG, Yang JS, Zhang Q, Liu GM. Salt-water transport in unsaturated soils under crop planting: Dynamics and numerical simulation. Pedosphere, 2005, 15 (5): 634-640
- [23] 李保国, 胡克林, 黄元仿, 刘刚. 土壤溶质运移模型的研究及应用. 土壤, 2005, 37 (4): 345-352

Quantitative Study on Soil Macropores by Dye Tracing and Image Processing

QIU Lin, WU Hua-shan, CHEN Xiao-min, PAN Jian-jun

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: With the paddy soil from the Tai Lake Region as a case for study, an introduction was presented to the application of the technique of dye tracing and image processing to quantitative study of soil macropores. Stained regions in the soil profile are places where soil pores exist. The bigger the aperture of a pore is, the more the dye solution imparts, and the darker the color of the stained region is. Images of soil profiles were processed with the GIS software, ArcGIS, and remote sensing image processing software ERDAS for color classification. Stained portions which represent macropores were picked out for computing the macropore contents. Results of the computation consist with the variation of soil porosity, soil clay content and soil saturated conductivity from top to bottom of the soil profile. Also factors that influence soil pore quantification were discussed.

Key words: Soil macropores, Dye tracing, Image processing