doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.025

基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析

张东旭　张洪江　程金花
(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 以重庆紫色砂岩区坡耕地田间染色示踪试验为基础,采用形态学和统计学方法,对 3 种坡耕地土壤剖面染色图像进行指标提取,运用多指标评价法确定了优先流指数 P_{FI},并结合几何学中的分形理论,定量评价了土壤优先流的发育程度。结果表明:6 个优先流特征指标(优先流区染色面积比、基质入渗深度、优先流分数、长度指数、峰值指数和变异系数)均表现出南瓜地和柑橘地的优先流程度高于玉米地;优先流指数 P_{FI}由大到小为南瓜地(0.88)、柑橘地(0.77)、玉米地(0);通过 FractalFox 2.0 软件计算得到的优先流湿润峰迹线分形维数由大到小为南瓜地、柑橘地、玉米地。与土壤优先流指数 P_{FI}进行比较,所得结果基本一致,说明利用分形维数来评价土壤优先流发育程度是准确可行的。

关键词: 坡耕地; 优先流; 染色示踪; 多指标评价; 分形维数; 定量评价
中图分类号: S152.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)12-0214-07

Quantitative Analysis of Preferential Flow in Slope Farmland Soils Based on Multi-index Evaluation and Fractional Dimension

ZHANG Dongxu　ZHANG Hongjiang　CHENG Jinhua
(*School of Soil and Water Conservation*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Preferential flow is the phenomenon of water and solute rapidly transport through preferential flow paths such as macropores, wormholes and root holes. Studying the development degree of preferential flow has a certain reference value for efficient use of agricultural fertilizer and prevention of groundwater pollution. With the purpose of evaluating the development degree of preferential flow under different slope farmlands in Chongqing purple sandstone area, the dye tracer experiments were designed in three sample regions (pumpkin, citrus and maize). The morphological and statistical methods were used to extract parameters from the image of soil profile in three slope farmlands. Multi-index evaluation method was used to determine the preferential flow indicator P_{FI}. Combined with fractal theory in geometry, the development degree of soil preferential flow was quantitatively evaluated. Six characteristic preferential flow indexes (staining area ratio of preferential flow area, uniform flow infiltration depth, preferential flow fraction, length index, peak index and coefficient of variation) revealed that the preferential flow of pumpkin and citrus was higher than that of maize; the order of preferential flow indicator P_{FI} from large to small was pumpkin (0.88), citrus (0.77) and maize (0). Box-counting dimension calculation of wetting front curve can characterize the non-uniformity of soil water infiltration. The larger box-counting dimension was, the more irregular shape of wetting front curve and the higher degree of preferential flow development were. Fractional dimension of wetting peak trace calculated by Fractal Fox 2.0 software basically got the same result, which showed that it was feasible to evaluate the development degree of soil preferential flow quantitatively. Fractional dimension with advantages of simple operation, low cost and high accuracy was suitable for field scale, which can enrich the study method of soil preferential flow.

Key words: slope farmland; preferential flow; dyeing tracer; multi-index evaluation; fractal box dimension; quantitative evaluation

收稿日期: 2017-04-26　修回日期: 2017-06-01
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-SB-03)和北京市科技计划项目(D151100005915001)
作者简介: 张东旭(1989—),男,博士生,主要从事水土保持研究,E-mail: 369212817@qq.com
通信作者: 张洪江(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与流域管理研究,E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn

引言

优先流是水流和溶质通过大孔隙、虫洞、根孔等优先流路径在土壤中快速运移的现象[1]。在天然非饱和土壤(农田、林地)中,这种现象尤为普遍[2]。优先流的存在会增强土壤水的交换补给能力,灌溉水和农药等来不及降解和过滤直接进入地下水,增加了土壤养分流失和地下水污染的风险[3]。因此,研究优先流发育程度,对于农业施肥的高效利用和地下水污染的防治具有一定的参考价值[4]。

国内外研究优先流的常用方法主要包括穿透曲线法、CT 扫描法和染色示踪法[5-7]。穿透曲线法虽然操作简单、成本低,但试验耗费时间长,计算较为复杂。CT 扫描法具有无损、精度高等优点,但成本高、分析过程繁琐、研究尺度小等,导致该方法的应用并不广泛。相比于前 2 种方法,染色示踪法是最简便、应用最广泛的研究方法,具有成本低、观察直观、试验耗时短等优点。目前国内外对优先流的研究主要集中在形成机理及其影响因素等方面,孙龙等[8]、FORRER 等[9]通过染色图像研究了优先流路径的分布特征,但如何从染色图像中直接提取优先流特征指标用以评价优先流程度的研究还鲜有报道。

近年来,国内少数学者开始定量研究优先流的发育程度。田香姣等[10]对土壤剖面的染色面积和染色深度进行分析,在一定程度上评价了农地和草地的优先流的发育状况,但指标太少,不能充分反映出土壤优先流程度大小。郭会荣等[11]通过室内土柱穿透实验,结合时间矩的方法,计算出优先流对溶质运移的贡献率,定量评价了优先流程度,但该方法试验耗费时间较长,使用起来较为复杂。陈晓冰等[12]通过分析变异系数 CV 评价了干湿农地优先流发育程度,但只是局限于一种农地的不同处理方式。吴庆华等[13]通过分析比较原状和扰动土柱的染色空间变异性,提出了优先流程度的评价准则,得到原状土柱变异系数低、优先流程度高的结论,但研究尺度和样本数量均较小,适用性和准确性还需进一步验证。

本文以重庆紫色砂岩区 3 种不同坡耕地田间染色示踪试验为基础,运用湿润峰迹线的分形维数对优先流程度进行定量评价与排序,并采用形态学理论和统计学分析方法,从染色图像中提取出 6 个优先流特征指标,通过优先流指数 P_{FI} 对 3 种坡耕地优先流发育程度加以验证,以期说明该方法用于坡耕地土壤优先流程度评价的可行性。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于三峡库区尾端的重庆市江津区李市镇,其地理位置为 106°17′ ~ 106°30′E,28°31′ ~ 28°43′N,海拔高度为 230 ~ 560 m,地势南高北低,地貌以深丘平坝为主。四季分明,无霜期长(340 d),年均降水量 1 033 mm,年均气温 15℃,属亚热带季风气候。土壤类型主要为紫色土和黄壤,土壤质地为粘壤土和砂质壤土。试验样地共 3 块,分别为南瓜地、柑橘地和玉米地,每种模式设置 3 个重复。其中柑橘地的样方主要布设在柑橘树之间较为平坦处,以减少主根对试验结果造成的影响。样地基本情况如表 1 所示。

表 1　试验样地基本情况

Tab. 1　Basic situation of test plots

样地	编号	耕作模式	海拔/m	坡度/(°)	坡向
南瓜地	P1	免耕	308	15	东南
	P2	免耕	304	14	东南
	P3	免耕	305	14	东南
柑橘地	C1	柑橘连作	308	10	西北
	C2	柑橘连作	310	11	西北
	C3	柑橘连作	310	10	西北
玉米地	M1	玉米连作	311	11	西南
	M2	玉米连作	313	13	西南
	M3	玉米连作	311	12	西南

1.2　染色示踪试验

首先清除样方内枯落物,平整土壤表面,防止其对试验造成影响。使用自制恒流泵以 150 mL/min 的流量,将预制的 9.6 L(当地大雨强度)浓度为 4 g/L 亮蓝溶液自边坡顶部均匀的输入观测区,然后用塑料布遮盖样方,防止外部条件变化对试验产生影响。染色示踪试验完成 24 h 后除去覆盖的塑料布,在染色区中心未扰动 50 cm × 50 cm 见方区域,以水平 10 cm 宽度垂直开挖 5 个竖直剖面,分别定义为1 ~ 5 号剖面,开挖深度为 50 cm。用标尺标注剖面的长度与宽度,使用高像素数码相机采集竖直染色剖面图像,剖面旁放置标准灰阶比色卡,用以校正图像色彩,减少明暗不均所带来的误差。染色剖面示意图见图 1。

1.3　图像处理过程

使用 ArcMap 10.2 软件对采集到的原始染色图像进行平面几何校正,竖直剖面染色图像大小为 50 cm × 50 cm(500 像素 × 500 像素)。使用 Adobe Photoshop CS3 软件中图像调整中颜色替换功能,先参照原始照片,用吸管工具对照片中染色土壤的颜

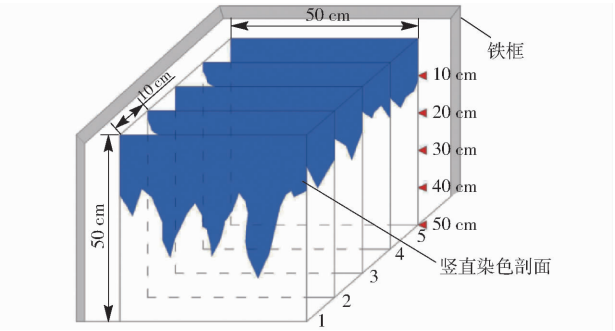

图 1 染色剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stained profile

色采样,确定染色区域。通过设置色相、灰度将染色土壤颜色替换为黑色,未染色区土壤为白色。图像数值转换可采用 Image-Pro Plus 6.0 软件中的 Bitmap 功能,黑色区域值为 255,白色区域为 0,并以 Excel 格式输出。

1.4 优先流特征指标

利用导出的 Excel 表格计算数值剖面染色图像的各项特征指标,各指标计算方法如下:

优先流区染色面积比 D_{Cpf}为优先流区染色面积占总面积的百分比,计算式为

$$D_{Cpf}=\frac{D_{pf}}{S}\times 100\% \tag{1}$$

式中 D_{pf}——优先流区染色面积,cm^2

S——图像总面积,cm^2

基质入渗深度 U_{niFr}[14] 为染色覆盖率降低至 80% 以前,入渗过程主要为基质流,其入渗深度称为基质入渗深度。优先流分数 P_{F-fr}[14] 为优先流占总渗透流量的分数,即

$$P_{F-fr}=\left(1-\frac{50U_{niFr}}{S_{Tot}}\right)\times 100\% \tag{2}$$

式中 S_{Tot}——总染色面积,cm^2

长度指数 L_i[15] 为在竖直剖面上每一层与上一层染色面积比的差的绝对值之和,即

$$L_i=\sum_{i=1}^{n}|D_{C(i+1)}-D_{Ci}| \tag{3}$$

式中 D_{Ci}、$D_{C(i+1)}$——土壤剖面第 i 层、$i+1$ 层对应的染色面积比

n——层数(以 1 mm 厚度为 1 层,$n=350$)

峰值 P_i[15] 为总染色覆盖率的垂直线与水平染色覆盖率曲线的交点的个数。变异系数 C_V[16] 为土壤剖面染色差异程度,即

$$C_V=\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(D_{Ci}-\overline{D}_C)^2}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}D_{Ci}} \tag{4}$$

式中 $\overline{D}_C$——染色面积比的平均值

1.5 优先流评价指数

首先使用极差法对坡耕地土壤 $A=\{P,M,C\}$ 的优先流指标 $G_j=\{G_1,G_2,\cdots,G_6\}$($G_1,G_2,\cdots,G_6$分别为 D_{Cpf}、U_{niFr}、P_{F-fr}、L_i、P_i、C_V)进行标准化处理得到无量纲值 Z_{ij},再求出各指标的均方差 $\sigma(G_j)$,最后利用均方差决策法[17] 确定各指标的权重系数 W_j。计算步骤如下:

正相关指标数据标准化

$$Z_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{5}$$

负相关指标数据标准化

$$Z_{ij}=\frac{X_{\max}-X_{ij}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{6}$$

式中 Z_{ij}——指标标准化后值

X_{ij}——该指标的测定值

$X_{\max}$——该指标中最大值

$X_{\min}$——该指标中最小值

i——某一指标 m 个数据的序号

j——指标的数量($j=1,2,\cdots,6$)

随机变量的均值 $E(G_j)$

$$E(G_j)=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}Z_{ij} \tag{7}$$

各指标 G_j的均方差 $\sigma(G_j)$

$$\sigma(G_j)=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(Z_{ij}-E(G_j))^2} \tag{8}$$

各指标 G_j的权重系数 W_j

$$W_j=\frac{\sigma(G_j)}{\sum_{j=1}^{6}\sigma(G_j)} \tag{9}$$

优先流评价指数 P_{FI}可以直接体现土壤优先流程度,其值越大,说明优先流程度越高。计算公式为

$$P_{FI}=\sum_{i=1}^{m}Z_{ij}W_j \tag{10}$$

1.6 湿润锋迹线分形维数

分形维数可以反映图像的形态特征[18],染色示踪试验中数码影像所记录的优先流湿润锋迹线,呈现出不规则、零碎、复杂的几何形态,具有明显的分形特征。本文研究采用计盒法来研究湿润峰的分形维数。取边长为 r 的正方形小盒子,对湿润峰迹线进行覆盖,则有些小盒子是空的,有些小盒子覆盖了迹线的一部分。计数多少小盒子不是空的,所得的非空盒子数记为 $N(r)$。然后缩小盒子的尺寸,所得 $N(r)$会增大,当 $r\to 0$ 时,得到分形维数 F_D[19]。其公式为

$$F_D=-\lim_{r\to 0}\frac{\lg N(r)}{\lg r} \tag{11}$$

若 $F_D=1$，表明湿润锋迹线为直线，此时为完全均匀流入渗状态，不存在优先流；若 $F_D>1$，表明湿润锋迹线为不规则曲线，此时存在优先流，且分形维数 F_D 越大，湿润锋迹线的不规则程度越高，说明优先流发育程度越高。在本研究中，盒子边长 r 的取值范围为 10 ~ 100 mm。土壤剖面湿润锋迹线分形维数的相关计算均通过专业软件 FractalFox 2.0 完成。

2　结果与分析

2.1　优先流染色图像及特征指标分析

通过图像提取技术对垂直剖面染色图像进行数值化，分别计算了优先流特征指标，各指标在一定程度上可以反映优先流程度（图 2），由于剖面较多，选择具有代表性的图像进行展示。图中黑色为染色区，白色为非染色区，红线为染色面积比，绿线为当 $D_C=80\%$ 时所对应的土壤深度，每张图片的右边为该剖面所对应的优先流特征指标。由图 2 可知，南瓜地、玉米地和柑橘地染色深度分别为 30、34、29 cm，染色面积比（D_C）分别为 22.80%、13.87% 和 17.26%。南瓜地染色图像中存在几条连通的指状通道，柑橘地的染色分布较随机，而玉米地染色较为均匀。3 种坡耕地土壤染色面积比均随土层深度的增加而减小，因为表层作物根系、生物活动多，大孔隙也较多，而深层土壤密度较大，更为紧实，很难形成大孔隙[20]。这与 SHENG 等[21]采用碘淀粉对土壤进行染色实验所得到的结果相一致。

6 个特征指标中，优先流区染色面积比（D_{Cpf}）、优先流分数（P_{F-fr}）、长度指数（L_i）和变异系数（C_V）呈现相同的趋势，由大到小表现为南瓜地、柑橘地、玉米地：南瓜地的优先流区染色面积比为 16.94%，远远大于柑橘地（9.96%）和玉米地（8.24%）；优先流分数南瓜地（70.73%）和柑橘地（69.09%）远远高于玉米地（42.05%）；南瓜地的长度指数分别高出柑橘地和玉米地 159.45 和 372.29；南瓜地和柑橘地的变异系数较为接近，分别为 0.22 和 0.21，是玉米地的 2.44 和 2.33 倍。基质入渗深度（U_{niFr}）分别为 2.30、1.50、3.50 cm，由大到小为玉米地、南瓜地、柑橘地，说明玉米地存在较高的基质流作用，相应的优先流程度最低。峰值指数（P_i）与染色图像

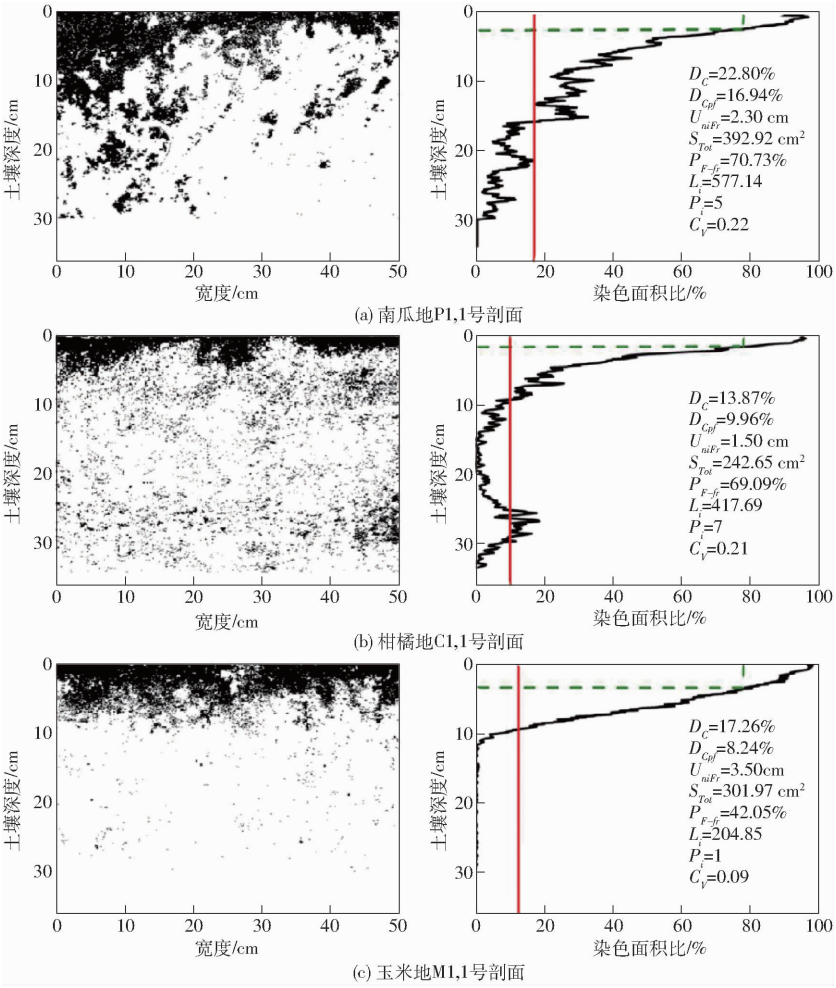

图 2　竖直剖面染色图像及其优先流指数

Fig. 2　Images of vertical stained profiles and preferential flow parameters

的异质性有关,表现为柑橘地高于南瓜地和玉米地。通过对 6 个优先流特征指标的对比分析,可以看出南瓜地和柑橘地相比于玉米地有着较高的优先流程度。其原因是:南瓜地采取免耕的模式,李文凤等[22]认为,免耕模式下作物残茬在表层土壤中可以增加土壤孔隙度,具有较好的优先流特征;柑橘树为小乔木,根系较玉米地更粗更发达,增加了土壤中的生物大孔隙的分布[23],优先流特征会更为明显。

2.2 优先流评价指数分析

分别对南瓜地(P)、玉米地(M)和柑橘地(C)土壤竖直染色剖面的优先流区染色面积比(D_{Cpf})、基质入渗深度(U_{niFr})、优先流分数(P_{F-fr})、长度指数(L_i)、峰值指数(P_i)和变异系数(C_V)6 个指标进行 Friedman 检验,得到 3 种坡耕地优先流表征指标之间均呈现显著差异($p < 0.001$),说明不同坡耕地下的优先流发育程度不同(图 3),具有统计分析意义。

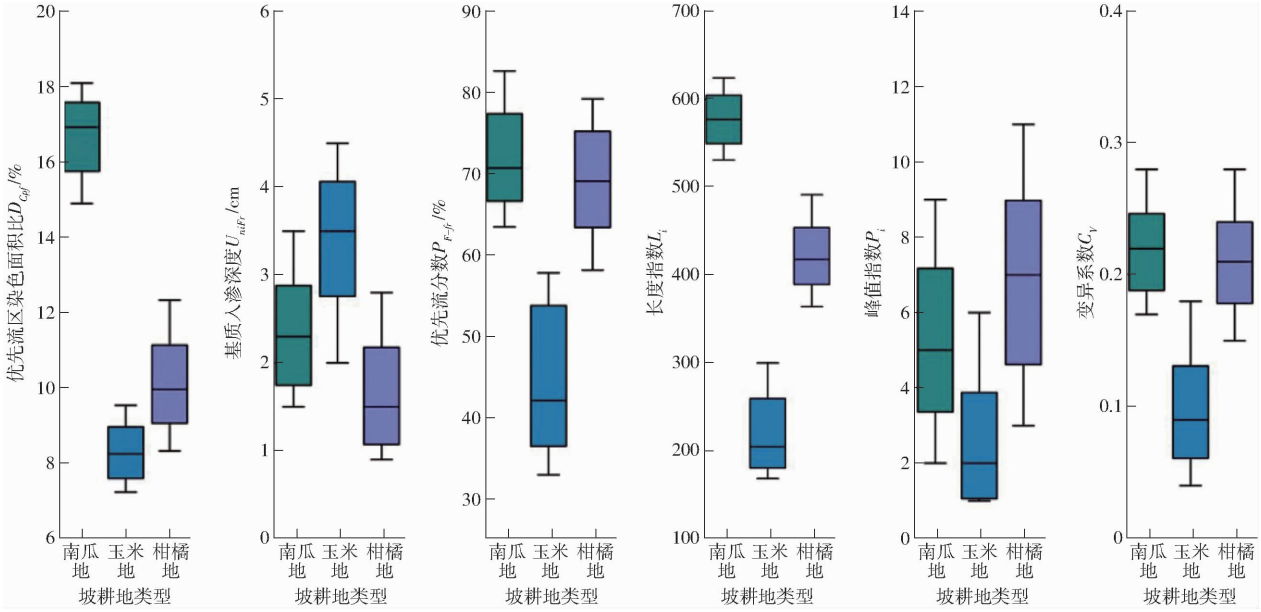

图 3 不同坡耕地土壤优先流指标箱线图

Fig. 3 Boxplots of preferential flow parameters in different slope farmlands

为了集中体现不同坡耕地土壤优先流程度,并消除不同指标之间的差异,本文采用多指标评价法对优先流程度进行综合评价。根据相关文献和已有的研究结果,从竖直剖面染色图像中提取出 6 个优先流特征指标可直接作为评价参数。各指标标准化后的均值、均方差及权重见表 2。

表 2 各评价指标标准化均值、均方差及权重

Tab. 2 Standardized mean, mean square deviation and weight of each index

指标	均值	均方差	权重
D_{Cpf}	0.40	0.75	0.167 5
U_{niFr}	0.53	0.71	0.159 2
P_{F-fr}	0.65	0.79	0.177 6
L_i	0.52	0.71	0.158 7
P_i	0.56	0.72	0.161 0
C_V	0.64	0.79	0.176 0

根据各指标标准化后的值及权重计算不同耕作方式下土壤优先流指数 P_{FI}(图 4)。从图 4 中可以看出,其中南瓜地 P 的优先流评价指数最大(0.88),其次是柑橘地 C(0.77),玉米地 M 的优先流评价指数最小,定量评价结果为 0(这主要是由于指标标准化时采用极差法造出的,这也是一个相对值,并非绝对值)。优先流程度由大到小排序为南瓜地、柑橘地、玉米地。

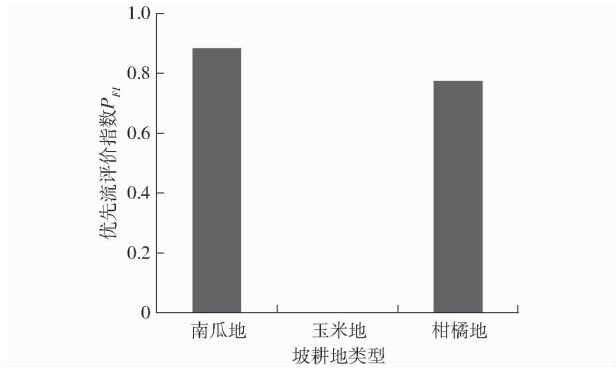

图 4 不同坡耕地土壤优先流评价指数 P_{FI}

Fig. 4 Preferential flow indicator in different slope farmlands

2.3 湿润峰迹线分形维数分析

土壤剖面湿润峰迹线分形维数(F_D)的变化,可以表征土壤水分入渗的不均匀程度,即分形维数越大,湿润峰迹线的形状越不规则,优先流发育程度越高。图 5 为 3 种坡耕地 $\ln r - \ln N(r)$ 关系曲线,可以看出各样地的分形维数计算曲线均具有较高的拟合精度,其决定系数 R^2 均大于 0.98。由表 3 可知,同

一种坡耕地 1、2、3 样地土壤湿润峰迹线的分形维数都比较接近，说明同一种坡耕地不同剖面染色形态基本一致，具有统计分析意义。但南瓜地 P1 中的分形盒维数标准差为 0.29，远高于其他样地，其原因是在对南瓜地 P1 的 5 个剖面染色图像进行处理时发现，有 2 个剖面染色图像的优先流区存在较为集中的染色带，这是由于根系贯穿形成较为联通的优先流路径所致，致使这 2 个染色图像的分形维数比其他 3 个小，从而导致标准差大。通过对不同样地湿润峰迹线分形维数的比较发现，南瓜地 3 个样地的分形维数均大于柑橘地大于玉米地，说明南瓜地的优先流程度远高于柑橘地和玉米地。最大入渗深度在一定程度上可以反映优先流发育程度，但受土壤自身含水率、结构和生物活动等多种因素的影响[24]，不能完整地定量描述优先流非均匀特征，存在一定的局限性。

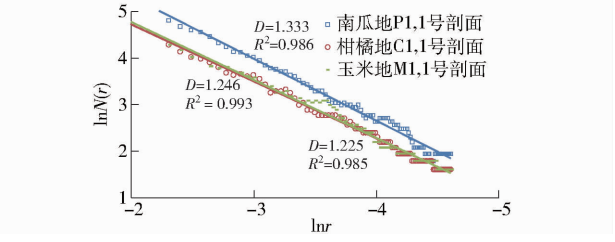

图 5　不同坡耕地优先流湿润峰迹线盒维数计算（$\ln r - \ln N(r)$ 曲线）

Fig. 5　Box-counting dimension calculation of wetting front curve for preferential flow in different slope farmlands

表 3　不同坡耕地土壤优先流湿润锋迹线分形特征

Tab. 3　Fractal box dimension of soil dyeing profile image in different slope farmlands

样地	编号	分形维数 F_D	最大入渗深度/cm	决定系数 R^2
南瓜地	P1	1.326 ± 0.29	30	0.986
	P2	1.341 ± 0.17	34	0.982
	P3	1.324 ± 0.18	33	0.991
柑橘地	C1	1.249 ± 0.15	34	0.993
	C2	1.242 ± 0.19	31	0.983
	C3	1.236 ± 0.18	32	0.988
玉米地	M1	1.221 ± 0.16	29	0.985
	M2	1.222 ± 0.14	28	0.985
	M3	1.187 ± 0.13	31	0.989

3　讨论

水分在土壤中运动形式包括基质流和优先流两部分，若知道总染色面积和基质流区的染色面积便可推求出优先流区染色面积，因此优先流区染色面积比、基质入渗深度和优先流分数均与染色模式有着密切的关系。南瓜地优先流区染色面积比远远高于玉米地和柑橘地，玉米地的基质流区面积和染色深度均为最大，南瓜地和柑橘地的优先流分数也远大于玉米地。FLURY 等[25]在对林地优先流的研究中指出，基质流深度和染色面积可以较为准确地反映出土壤剖面优先流发育状况，即基质流深度越大，优先流区染色面积越小，优先流分数越小，优先流发育程度越低，说明南瓜地和柑橘地的优先流程度均高于玉米地。

在本研究中，长度指数、峰值指数和变异系数均是与染色图像异质性相关的指标。由于优先流属于非均匀流，水流经过区域的染色变化更为明显，这 3 个指标可以较为准确地反映各层之间染色模式变化的程度，其数值越大，优先程度越大。南瓜地和柑橘地的长度指数、峰值指数和变异系数均大于玉米地，说明玉米地的优先流发育程度最差，这与陈晓冰等[12]利用染色图像变异性分析优先流程度得到的结果一致。由于基质流区染色均匀，染色面积较大，变化程度较低，吴庆华等[13]在研究中没有剔除基质流区的影响，得到变异性越小优先流程度越高的结果，存在一定的误差。

以往对土壤优先流的研究大多是基于现象的描述，定量评价也只是对染色面积和染色深度进行比较，很难全面反映土壤的优先流特征，存在一定的局限性[26]。本研究多指标评价法计算的优先流程度评价指数 P_{FI}，可以较为准确地反映出土壤优先流程度。同时，分形理论目前已广泛应用于医学、生物学等领域[27-28]，在土壤学中的应用大多是对粒径组成的研究[29]。将该方法引入优先流程度的定量评价中，可以使复杂的分析简单化，通过染色图像这种易于获取的数据就可以定量分析土壤中优先流的形态特征，丰富了土壤优先流的研究方法，具有一定的实际意义。利用分形理论确定的分形维数表现出的优先流程度由大到小为柑橘地、南瓜地、玉米地，与 P_{FI} 的评价结果一致，说明湿润峰迹线的分形维数能够反映土壤优先流发育程度，结果准确可行。

4　结束语

通过野外染色示踪试验，从图像信息的角度对重庆紫色砂岩区 3 种坡耕地土壤优先流程度进行定量评价。结果表明：本研究提出的 6 个优先流特征指标，即优先流区染色面积比、基质入渗深度、优先流分数、长度指数、峰值指数和变异系数指标，在一定程度上可以较为准确地反映出土壤优先流的发育程度；利用多指标评价法得到的优先流程度评价指数 P_{FI} 由大到小为南瓜地（0.88）、柑橘地（0.77）、玉米地（0）。同时，运用分形维数所反映出的湿润峰不规则程度对优先流进行了定量评价，其结果与 P_{FI}

基本一致,进一步说明该方法在土壤优先流发育程度评价上的适用性。该方法基于田间尺度,具有简单易行、成本低、准确性高的特点,丰富了定量研究优先流的方法。

参 考 文 献

1 KRAMERS G, RICHARDS K G, HOLDEN N M. Assessing the potential for the occurrence and character of preferential flow in three Irish grassland soils using image analysis[J]. Geoderma, 2009, 153(3-4): 362-371.

2 王伟,张洪江,程金花,等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系[J]. 应用生态学报,2010,21(5):1217-1223.
WANG Wei, ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, et al. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broadleaved forest soils of Simian Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(5):1217-1223. (in Chinese)

3 LARSSON M, JARVIS N, TORSTENSSON G, et al. Quantifying the impact of preferential flow on solute transport to tiledrains in a sandy field soil[J]. Journal of Hydrology, 1999,215(1-4):116-134.

4 盛丰,张利勇,吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(6):1-10.
SHENG Feng, ZHANG Liyong, WU Dan. Review on research theories and observation techniques for preferential flow in unsaturated soil[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6):1-10. (in Chinese)

5 ZHEN Qing,MA Wenmei, LI Mingming, et al. Effects of vegetation and physicochemical properties on solute transportin reclaimed soil at an opencast coal mine site on the Loess Plateau, China[J]. CATENA, 2015, 133:403-411.

6 PINUELA J, ALVAREZ A, ANDINA D, et al. Quantifying a soilpore distribution from 3D images: multifractal spectrum through wavelet approach[J]. Geoderma, 2010, 155(3-4):203-210.

7 FERNANDO G, MARTIN H. Lead and soil properties distributions in a roadside soil: effect of preferentialflow paths[J]. Geoderma, 2012, 170(3):305-313.

8 孙龙,张洪江,程金花,等. 柑橘地土壤大孔隙与优先流的关系研究[J]. 水土保持通报,2012,32(6):75-79.
SUN Long, ZHANG Hongjiang,CHENG Jinhua, et al. Relationship between soil macropore and preferential flow in citrus garden [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(6):75-79. (in Chinese)

9 FORRER I, PAPRITZ A, KASTEEL R, et al. Quantifying dyetracers in soil profiles by image processing[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(2):313-322.

10 田香姣,程金花,杜士才,等. 2 种土地利用方式下的优先流特征[J]. 水土保持学报,2014,28(3):37-41.
TIAN Xiangjiao, CHENG Jinhua, DU Shicai, et al. Characteristics of preferential flow under two kinds of land use patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(3):37-41. (in Chinese)

11 郭会荣,靳孟贵,王云. 基于室内土柱穿透实验的优先流定量评价[J]. 地质科技情报,2009,28(6):101-106.
GUO Huirong, JIN Menggui, WANG Yun. Quantitative evaluationof preferential flow basedon laboratory breakthrough experimentsof soilcolumns[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(6):101-106. (in Chinese)

12 陈晓冰,张洪江,程金花,等. 基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):93-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150514&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.014.
CHEN Xiaobing, ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, et al. Quantitative evaluation of preferential flow development degree based on dyed image variability analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 93-100. (in Chinese)

13 吴庆华,张家发,蔺文静,等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. 农业工程学报,2014,30(7):82-90.
WU Qinghua, ZHANG Jiafa, LIN Wenjing, et al. Appling dyeing tracer to investigate patterns of soil water flow and quantify preferential flow in soil columns[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7):82-90. (in Chinese)

14 VAN SCHAIK N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. CATENA, 2009, 78(1):36-47.

15 TOBELLA A B, REESE H, ALMAW A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. Water Resources Research, 2014, 30(7):3342-3354.

16 贾俊平,何晓群,金勇进. 统计学[M]. 5 版. 北京:中国人民大学出版社,2012.

17 郭艳红. 基于均方差分析法的北京市土地资源承载力评价[J]. 资源与产业,2011,13(6):62-66.
GUO Yanhong. Evaluation of Beijing's land resources load capacity based on mean variance analysis[J]. Resources & Industries, 2011,13(6):62-66. (in Chinese)

18 LIU Y, CHEN L Y, WANG H M, et al. An improved differential box-counting method to estimate fractal dimensions of gray-level images[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2014, 25(5):1102-1111.

19 [英]肯尼思·法尔科内. 分形几何—数学基础及其应用[M]. 沈阳:东北大学出版社,2003.

20 张东旭,程金花,王伟,等. 鹤大高速(G11)低路基边坡土壤优先流特征[J]. 水土保持学报,2016, 30(5):76-81.
ZHANG Dongxu, CHENG Jinhua, WANG Wei, et al. Characteristics of preferential flowpaths in slope soils of low roadbed highway[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5):76-81. (in Chinese)

21 SHENG Feng, WANG Kang, ZHANG Renduo, et al. Characterizing soil preferential flow using Iodine-Starch staining experiments and the active region model[J]. Journal of Hydrology, 2009, 367(1-2):115-124.

(下转第 277 页)

Rome：FAO Irrigation and Drainage Paper，1998.

23 张明. 陕西关中冬小麦/夏玉米轮作体系下合理施肥技术研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2011.
ZHANG Ming. Research of reasonable fertilizer application technology of winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi[D]. Yangling：Northwest A&F University，2011.（in Chinese）

24 EPA. List of drinking water contaminants：ground water and drinking water[S/OL]. Washington，DC：US Environmental Protection Agency，2005. https：//www. epa. gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations.

25 SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association，1968，63(324)：1379－1389.

26 MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica，1945，13(3)：245－259.

27 KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London：Charles Griffin，1975.

28 刘帝，操信春，王玉宝. 基于田间实际耗水的作物生产水足迹[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(8)：719－724.
LIU Di，CAO Xinchun，WANG Yubao. Water footprint of grain production based on crop water consumption[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2014，32(8)：719－724.（in Chinese）

29 CAO Xinchun，WU Pute，WANG Yubao，et al. Assessing blue-green water utilization in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2014，18(8)：3165－3178.

30 史利洁，吴普特，王玉宝，等. 基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价[J]. 中国生态农业学报，2015，23(5)：650－658.
SHI Lijie，WU Pute，WANG Yubao，et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2015，23(5)：650－658.（in Chinese）

31 雷锦飞，刘斌侠，付存仓，等. 岐山县粮食作物施肥现状及存在问题[J]. 陕西农业科学，2014，60(3)：84－86.

（上接第 220 页）

22 李文凤，张晓平，梁爱珍，等. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征[J]. 应用生态学报，2008，19(7)：1506－1510.
LI Wenfeng，ZHANG Xiaoping，LIANG Aizhen，et al，Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2008，19(7)：1506－1510.（in Chinese）

23 魏虎伟，程金花，张洪江，等. 四面山 2 种林地大孔隙特征与优先流关系研究[J]. 水土保持学报，2012，26(4)：263－268.
WEI Huwei，CHENG Jinhua，ZHANG Hongjiang，et al. Relationships between soil macropores properties and preferential flow about two kind of woodlands in simian mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2012，26(4)：263－268.（in Chinese）

24 张欣，张洪江，张福明，等. 西南山区农地土壤前期含水量对优先流的影响[J]. 水土保持学报，2014，28(2)：1－7.
ZHANG Xin，ZHANG Hongjiang，ZHANG Fuming，et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in agriculturall and of southwest mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2014，28(2)：1－7.（in Chinese）

25 FLURY M，FLUHLERH，JURYW A，et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water—a field study[J]. Water Resources Research，1994，30(7)：1945－1954.

26 梁建宏，吴艳宏，周俊，等. 土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(1)：220－227. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx？ file_no＝20170129&flag＝1&journal_id＝jcsam. DOI：10.6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 029.
LIANG Jianhong，WU Yanhong，ZHOU Jun，et al. Quantitative evaluation of effect of soil types on preferential flow pathways and soil phosphorus forms[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(1)：220－227.（in Chinese）

27 CYMBERKNOP L J，LEGNANI W，BARRA J G，et al. Fractal dimension as an index of left ventricular ischaemia：a pilot study[J]. Physiological Measurement，2013，34(1)：83－97.

28 刘继龙，周延，付强，等. 黑土区玉米地作物信息多重分形与多尺度相关特征研究[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(6)：163－170，162. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx？ file_no＝20160621&flag＝1&journal_id＝jcsam. DOI：10.6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 06. 021.
LIU Jilong，ZHOU Yan，FU Qiang，et al. Multifractal and multi-scale correlation characteristics of crop information of corn field in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(6)：163－170，162.（in Chinese）

29 王金满，张萌，白中科，等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. 农业工程学报，2014，30(4)：230－238.
WANG Jinman，ZHANG Meng，BAI Zhongke，et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencastcoal mine dump in loess area[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(4)：230－238.（in Chinese）