

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.023

孟凡旭, 王树森, 马迎梅, 等. 有机肥施用量对残塬沟壑区苹果园土壤优先流特征的影响. 土壤, 2020, 52(6): 1272–1280.

## 有机肥施用量对残塬沟壑区苹果园土壤优先流特征的影响<sup>①</sup>

孟凡旭<sup>1</sup>, 王树森<sup>1\*</sup>, 马迎梅<sup>1</sup>, 张淑媛<sup>1</sup>, 秦富仓<sup>1</sup>, 罗于洋<sup>1</sup>, 王迪海<sup>2</sup>, 郭宇<sup>1</sup>, 郭向东<sup>1</sup>, 程冀文<sup>1</sup>, 张娜<sup>1</sup>, 张平<sup>1</sup>

(1 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 荒漠生态系统保护与修复国家林业局重点实验室, 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 呼和浩特 010018; 2 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为研究有机肥施用量对残塬沟壑区苹果园土壤优先流特征的影响, 以残塬沟壑区苹果园为研究对象, 采用室外染色示踪法结合形态学和统计学方法, 对永寿县苹果园土壤垂直染色剖面进行定量分析, 使用均方差决策法综合各优先流特征指标对 0 kg/hm<sup>2</sup>(CK)、6 000 kg/hm<sup>2</sup>(T1)、9 000 kg/hm<sup>2</sup>(T2)、12 000 kg/hm<sup>2</sup>(T3)四种不同有机肥施用量苹果园土壤优先流特征进行研究。结果表明: ①不同有机肥施用量样地土壤染色面积比随土壤深度的变化状况均与 Logistic 曲线拟合程度较好, 决定系数  $R^2$  均大于 0.986。②选用的优先流特征指标中基质流入渗透深度、优先流分数、变异系数和分形维数与均方差决策法计算出的优先流发育程度结果一致, 优先流发展程度表现为 T3>T2>T1>CK。但平均最大入渗深度、优先流区染色面积比和长度指数在评价优先流程度中结果有些偏差, 表现为 T3>T2>CK>T1。③利用均方差决策法得到的优先流指数由大到小为: T3(0.75)、T2(0.59)、T1(0.27)、CK(0.25), 随着有机肥施肥量的增加, 优先流程度也随之增加。本研究可为土壤优先流特征综合评价提供参考, 并为残塬沟壑区果园合理施肥提供依据。

**关键词:** 残塬沟壑区; 苹果园; 染色示踪; 土壤优先流; 均方差决策法

**中图分类号:** S152.7 **文献标志码:** A

## Effects of Different Application Rates of Organic Fertilizer on Preferential Flow Characteristics in Orchard in Plateau Gully Region

MENG Fanxu<sup>1</sup>, WANG Shusen<sup>1\*</sup>, MA Yingmei<sup>1</sup>, ZHANG Shuyuan<sup>1</sup>, QIN Fucang<sup>1</sup>, LUO Yuyang<sup>1</sup>, WANG Dihai<sup>2</sup>, GUO Yu<sup>1</sup>, GUO Xiangdong<sup>1</sup>, CHENG Jiwen<sup>1</sup>, ZHANG Na<sup>1</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>

(1 College of Desert Control Science and Engineering, Key Laboratory of State Forest Administration for Desert Ecosystem Protection and Restoration, Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to study the effect of organic fertilizer application on soil preferential flow characteristics of apple orchard in plateau gully region, field dyeing tracer, morphology and statistical methods were used to quantitative study the vertical dyeing soil profiles in an apple orchard in Yongshou County, Xianyang City of Shaanxi Province, the mean square error decision and preferential flow characteristic indexes were used to analyze the preferential flow characteristics in apple orchard soils under four organic fertilizer fertilization rates (0, CK; 6 000 kg/hm<sup>2</sup>, T1; 9 000 kg/hm<sup>2</sup>, T2; 12 000 kg/hm<sup>2</sup>, T3). The results showed that: 1) The change of soil dyeing area ratio with soil depth of all soil profiles was well fitted to the logistic curve, and the determination coefficient  $R^2$  was greater than 0.986. 2) The results of matrix infiltration depth, preferential flow fraction, coefficient of variation and fractal dimension in the selected preferential flow characteristic indexes were consistent with those calculated by mean square deviation decision method, the development degree of preferential flow was T3 > T2 > T1 > CK. However, the average maximum infiltration depth, the ratio of dyeing area to preferential flow zone and the length index showed some deviations in the assessment of preferential flow degree, which was shown as T3 > T2 > CK > T1. 3) The preferential flow index obtained by mean square error decision method was 0.75 for T3, 0.59 for T2, 0.27 for T1 and 0.25 for CK, indicating the preferential flow degree is

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504605)资助。

\* 通讯作者(wsswt@126.com)

作者简介: 孟凡旭(1995—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: 351450024@qq.com

increased with the increase of fertilizer application rate. The study can provide a reference for a comprehensive evaluation of soil preferential flow characteristics and provide a basis for reasonable fertilization for orchards in plateau gully region.

**Key words:** Gully region of Plateau; Orchard; Dyeing tracer; Soil preferential flow; Mean square error decision method

降雨、灌溉后水分补给地下水的形式分为活塞流和优先流两种, 活塞流是水分层层推进、湿润锋均匀下移的水分运动形式<sup>[1]</sup>; 优先流是水分绕过大部分土壤基质, 仅从少部分土体快速入渗到达土壤深处的水分运动形式<sup>[2]</sup>。1973 年 Petrus 最早提出了优先流这一概念, 由于优先流在天然非饱和土壤中的普遍性, 近年来优先流的研究引起了国内外学者的广泛关注<sup>[3-5]</sup>。目前研究优先流特征主要是基于染色示踪法<sup>[6-7]</sup>、室内模拟法<sup>[8]</sup>以及数学模拟<sup>[9]</sup>等方法, 其中, 染色示踪法成本低, 且可直观反映降雨/灌溉后土壤水分在自然状态下的运移情况, 成为土壤优先流特征研究中使用最广泛使用的方法。

目前, 优先流研究主要涉及到农业<sup>[10]</sup>、林业<sup>[11]</sup>、生态<sup>[12]</sup>、环境污染<sup>[13]</sup>等方面, 对受到人为干扰(施肥、林下管理)的果园研究则很少。而陕西省残源沟壑区是我国主要的苹果产区, 苹果产业在带动区域农业经济中发挥着重要的作用。苹果作为耗水强度和耗水深度较高的高耗水作物, 其大面积种植加剧了该地区的水资源供需矛盾, 使得水分成为制约苹果生长及产量等的重要因素<sup>[14]</sup>。因此, 在此背景下开展残源沟壑区苹果园土壤优先流特征研究有着重要的理论和现实意义。

最初使用染色示踪法对土壤优先流特征的研究大多是通过定性的方法对优先流特征进行描述, 2011 年肖自幸等<sup>[15]</sup>通过土壤染色面积比和染色深度对优先流发育状况进行了定量的分析。之后又有一系列研究者提出使用优先流分数、长度指数<sup>[16]</sup>、变异系数<sup>[17]</sup>、分形维数<sup>[10]</sup>等各优先流评价指标对优先流特征进行定量评价, 丰富了优先流评价方法。但极少有人综合各优先流指标参数, 对土壤优先流特征进行综合分析。

因此, 本文在前人研究的基础上, 使用均方差决

策法综合各土壤优先流特征各评价指标, 对陕西省残源沟壑区 0、6 000、9 000、12 000 kg/hm<sup>2</sup> 四种不同有机肥施用量果园土壤优先流的特征进行分析并作出定量评价, 以期对土壤优先流发育程度综合评价提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验样地位于陕西省咸阳市永寿县马坊塬<sup>[18]</sup>, 地理位置为 34°29' ~ 34°59' N, 107°56' ~ 108°20' E, 该区位于渭北高原南缘, 属暖温带大陆性气候。年平均气温 10.2 °C, 年平均降雨量 610.66 mm, 无霜期 210 d; 土壤母质为第四纪风积黄土, 属于褐土土类, 壤土亚类, 黄土母质。地下水埋深 20 ~ 120 m。属典型的旱作农业区, 试验地周围无污染源。苹果(*Malus pumila* Mill.)经济林种植面积较大, 果业收入占农民收入 40% 以上。该地区耕层土壤有机质 11.66 g/kg, 碱解氮 26.69 mg/kg, 有效磷 16.94 mg/kg, 速效钾 100.59 mg/kg, pH 7.65, 容重 1.30 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 样地选取与布 设

2018 年 7 月, 在实地调查的基础上, 选取重复为 3、面积为 400 m<sup>2</sup>(20 m × 20 m)的 4 种不同有机肥施用量(0、6 000、9 000、12 000 kg/hm<sup>2</sup>)苹果园样地, 进行染色示踪试验, 同时, 进行土壤物理性质测定。选取的 4 个样地除有机肥施用量不同外, 化肥施用量及其他各管理措施均一致。苹果树品种为富士, 果龄为 20 a, 栽植密度为 625 株/hm<sup>2</sup>(4 m × 4 m); 施肥时间为 3 月、5 月、10 月; 施肥方式均采用沟施的方式; 果园林下管理方式为自然生草。染色示踪试验区布设于苹果树间平坦处, 同时避开施肥的条沟。各样地基本情况见表 1。

表 1 试验地基本情况  
Table 1 Basic information of tested plots

样地	有机肥用量 (kg/hm <sup>2</sup> )	有机质 (g/kg)	pH	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	田间持水量 (%)	土壤含水率 (%)	土壤现存贮水量 (mm)	土壤饱和贮水量 (mm)
CK	0	7.98	7.61	1.35	21.74	8.50	573.75	2 379.40
T1	6 000	11.10	7.47	1.33	20.13	8.99	597.84	2 553.93
T2	9 000	12.55	7.73	1.28	21.19	9.55	611.20	2 435.44
T3	12 000	15.01	7.78	1.26	22.75	10.18	641.34	2 567.82

### 1.3 染色示踪试验

试验前在不破坏表土的前提下清除样方内枯落物及碎石,平整土壤表面,防止其对试验造成影响。运用类似双环试验的原理<sup>[17]</sup>,内环放置一个 30 cm × 30 cm × 30 cm 的铁框,外环放置一个 50 cm × 50 cm × 30 cm 的铁框,垂直插入土壤 15 cm,夯实铁框内侧 5 cm 范围内的土壤,以提高试验精度。试验内环所用亮蓝溶液浓度为 4 g/L,体积为 5 L;外环注入与内环相同高度的水(13 L)以防止内环的亮蓝溶液发生侧渗,再用塑料布覆盖于铁皮方框上并将其固定,防止外部条件的变化对试验产生影响。染色 8 h 后,去除塑料布及铁框,沿土壤垂直方向开挖土壤剖面到最大染色深度,修整染色剖面,用标尺标注土壤长度与宽度,以水平 5 cm 宽度垂直挖开 5 个土壤剖面,并使用相机分别采集各染色剖面图像。染色示踪试验的同时,每个试验地按照 10 cm 为一个土层,使用环刀采集 0 ~ 60 cm 土壤样品各 3 个用于土壤容重、最大持水量、最小持水量、毛管持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量等土壤物理指标的测定。具体分析方法参照《森林土壤分析方法》<sup>[19]</sup>。

### 1.4 染色图像处理

将拍摄到的土壤剖面染色图像导入到 Photoshop 软件中,通过裁剪、校正等步骤将图片转化为由黑色(像素值为 0)和白色(像素值为 255)组成的二元信息矩阵图像;运用 Image Pro Plus 进行降噪处理并输出由 0 和 255 组成的二值矩阵,以此二值矩阵为依据对优先流区染色面积比( $D_C$ )、基质流入渗深度( $U_{niFr}$ )、平均最大入渗深度( $U_{max}$ )、土壤优先流分数( $P_{F-fr}$ )、长度指数( $L_i$ )、分形维数( $D$ )、土壤染色形态变异系数(CV)进行计算。

### 1.5 数据分析

**1.5.1 优先流发生特征及参数的计算** 1)优先流区染色面积比  $D_C$  为优先流区染色面积占总面积的百分比,计算式为<sup>[20]</sup>:

$$D_C = \frac{D_p}{D_p + N_D} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $D_C$  为优先流区染色面积比(%);  $D_p$  为优先流区染色面积( $\text{cm}^2$ );  $N_D$  为土壤剖面未染色面积( $\text{cm}^2$ )。

2)在土壤染色覆盖率降低至 80% 以前,入渗过程主要为基质流,其入渗深度称为基质流入渗深度。基质流入渗深度  $U_{niFr}$  为土壤剖面染色面积比  $\geq 80\%$  时对应的深度( $\text{cm}$ )<sup>[14]</sup>。

3)平均最大入渗深度  $U_{max}$  为土壤剖面总染色面积对应的深度( $\text{cm}$ )<sup>[21]</sup>。

4)土壤优先流分数  $P_{F-fr}$  为优先流占总渗透量的比值,反映了优先流在土壤中的发生程度,值越大代表优先流程度越明显,计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$P_{F-fr} = \left(1 - \frac{U_{niFr} \cdot W}{S_{Tot}}\right) \quad (2)$$

式中:  $P_{F-fr}$  为优先流分数(%);  $W$  为土壤剖面染色宽度( $\text{cm}$ );  $S_{Tot}$  为总染色面积( $\text{cm}^2$ )。

5)长度指数  $L_i$  为在竖直剖面上每一层与上一层染色面积差的绝对值之和,该参数较大的土壤优先流更发育。计算公式为<sup>[22]</sup>:

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

式中:  $L_i$  为长度指数;  $D_{C_i}$ 、 $D_{C(i+1)}$  为土壤剖面第  $i$  层、 $i+1$  层对应的染色面积比;  $n$  为层数(以 1 mm 厚度为 1 层)。

6)染色部分图像的分形维数  $D$  代表水分入渗的不均匀程度,分形维数越大入渗越不均匀,优先流发育程度越高<sup>[18]</sup>。本试验利用 Matlab 编制程序对染色图像的分形维数进行计算。计算前利用科克曲线(Koch curve)和谢尔宾斯基三角形(Sierpinski triangle)对程序精度进行验证,其相对误差为 0.07%,精度较高,可以进行后续计算。

7)土壤染色形态变异系数 CV 为土壤剖面染色差异程度,反映了土壤优先流的发育程度,变异系数越低,土壤剖面染色程度的差异越高,优先流程度越高。变异系数  $\geq 0.5$  为优先流程度一般发育,  $0.5 \sim 0.25$  为中等发育,  $\leq 0.25$  为非常发育,计算公式为<sup>[9,14]</sup>:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_{C_i} - \overline{D_C})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{C_i}} \quad (4)$$

式中: CV 为变异系数;  $\overline{D_C}$  为染色面积比的平均值。

**1.5.2 评价指标标准化** 采用极差变换法<sup>[23]</sup>进行无量纲标准化处理,经过标准化处理后所有指标都会满足[0,1]的范围,并且最终所有指标都会转化为正向指标,优化后最优结果趋近于 1,最差结果趋近于 0。具体计算公式如下:

$$G_{ij} = \frac{B_i - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} \quad (\text{正向指标}) \quad (5)$$

$$G_{ij} = \frac{B_{\max} - B_i}{B_{\max} - B_{\min}} \quad (\text{逆向指标}) \quad (6)$$

式中:  $G_{ij}$  为指标标准化后的值;  $B_i$  为第  $i$  项指标的测定值;  $B_{\max}$  为该指标中的最大值;  $B_{\min}$  为该指标中的最小值。

**1.5.3 基于均方差决策法的优先流综合评价** 采用均方差决策法对 4 种有机肥施用量苹果园土壤优先流特征进行综合评价。用标准化后的值作为各评价指标随机变量的取值, 计算出随机变量的均值、均方差, 将这些均方差归一化, 获得各指标的权重系数, 最后使用权重系数和各优先流评价指标标准化后的值计算不同有机肥施用量果园优先流特征得分<sup>[23]</sup>。具体计算步骤为:

1) 计算随机变量的均值  $E(G_j)$ :

$$E(G_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{ij} \quad (7)$$

2) 计算指标集  $G_j$  的均方差:

$$\sigma(G_j) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_{ij} - E(G_j))^2} \quad (8)$$

3) 计算指标集  $G_j$  的权重系数:

$$W(G_j) = \frac{\sigma(G_j)}{\sum_{i=1}^m \sigma(G_j)} \quad (9)$$

4) 多指标决策与排序:

$$D_i(W) = \sum_{j=1}^m G_{ij} W(G_j) \quad (10)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 残源沟壑区苹果园土壤染色剖面形态特征

基质流入渗深度  $U_{niFr}$ 、平均最大入渗深度  $U_{max}$  和优先流区染色面积比  $D_C$  是能够描述优先流在垂直剖面运动轨迹的 3 个易得参数。由表 2 可知, 苹果园  $U_{niFr}$ 、 $U_{max}$  和  $D_C$  在多样地之间存在一定差异。随着有机肥施用量的增加,  $U_{niFr}$  整体呈现增加的趋势, CK 样地  $U_{niFr}$  最小为 11.05 cm, T1、T2、T3 样地分别比 CK 大 0.73、2.81、4.13 cm, 除 CK 和 T1 样地差异不显著外, 多样地间差异显著。其原因主要是由于有机肥施用量的增加能够降低土壤容重(表 1), 使土壤更容易产生裂隙<sup>[24]</sup>。土壤  $U_{max}$  随着有机肥施用量的增加整体也呈现增加的趋势。 $U_{max}$  最小的为 T1 样地, CK、T2、T3 样地分别比 T1 大 3.15、7.13、12.43 cm, 除 CK 和 T1 样地差异不显著外, 多样地间差异显著。这主要是因为有机肥施用量高的苹果园内草本植物生长情况较好, 较深层次土壤(20~40 cm)根系较为发达, 根系腐烂后会产生深层土壤的大孔隙结构。 $D_C$  变化规律与  $U_{max}$  变化一致, 最小的为 T1 样地, CK、T2、T3 样地分别比 T1 大 3.24%、11.15%、13.71%。

表 2 不同有机肥施用量样地土壤染色形态变化

Table 2 Changes of soil dyeing morphology in sample plots under different organic fertilizer application rates

样地	基质流入渗深度 $U_{niFr}$ (cm)	平均最大入渗深度 $U_{max}$ (cm)	优先流区染色面积比 $D_C$ (%)
CK	11.05 ± 0.99 c	31.90 ± 1.96 c	38.76 ± 4.41 b
T1	11.78 ± 0.78 c	28.75 ± 1.32 c	35.52 ± 1.91 b
T2	13.86 ± 0.50 b	39.03 ± 1.24 b	46.67 ± 2.20 a
T3	15.18 ± 0.73 a	44.33 ± 0.98 a	49.23 ± 1.72 a

注: 同列不同小写字母表示多样地间差异显著( $P < 0.05$ )。

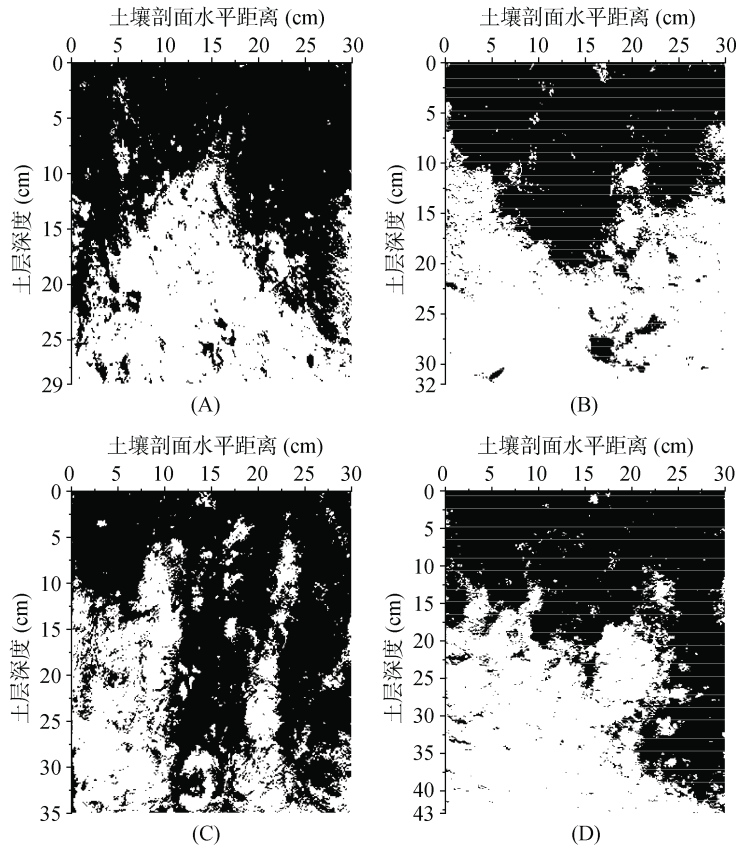
分别在 4 种有机肥施用量样地各选取 1 个具有代表性的二值化染色剖面影像(图 1), 从图 1 中可以看出, 多样地染色面积随土层深度的增加呈现减小的趋势, 同时残源沟壑区苹果园渗流过程中确实存在优先流现象, 土壤垂直剖面染色形态由土壤表层至深层呈上下联通的染色分化形态。说明基质流与优先流伴随发生。同时优先均出现在入渗湿润锋部位。从形态上看优先流特征无一定规律可循, 但其入渗深度与有机肥施用量存在明显相关性, 即有机肥施用量越大, 入渗深度亦越大。

### 2.2 残源沟壑区苹果园土壤优先流纵向变化的函数拟合

土壤染色面积比是土壤优先流特征研究最初使用较多的一个优先流特征指标, 可以直观地描述优先

流在土壤中的运动轨迹。各有机肥施用量样地染色面积比例均随优先流入渗深度增大而减小(图 1), 说明入渗过程非均衡进行, 存在明显的优先流渗流现象。

为了进一步研究苹果园土壤优先流形态特征的纵向变化规律, 选取 Logistic 函数、线性函数、指数函数、二次函数对多样地观测剖面染色面积比( $y$ )及其对应的土层深度( $x$ )进行回归分析, 比较 4 种函数的拟合优度(表 3), 绘制实测数据与函数拟合值的关系曲线, 拟合二者的对应关系(图 2)。由表 3 可知, 各函数拟合效果表现为: Logistic 函数 > 线性函数 > 二次函数 > 指数函数。其中 Logistic 函数决定系数( $R^2$ )为 0.986~0.997, 平均为 0.993; 二次函数  $R^2$  为 0.954~0.981, 平均为 0.965; 线性函数  $R^2$  为 0.953~0.975, 平均为 0.959; 指数函数  $R^2$  为 0.685~0.907, 平均为



(A、B、C、D 分别为 0、6 000、9 000、12 000 kg/hm<sup>2</sup> 有机肥施用量样地)

图 1 不同有机肥施用量样地土壤染色特征

Fig. 1 Soil dyeing characteristics of sample plots under different organic fertilizer application rates

0.808。Logistic 函数表达式为： $y=A_2+(A_1-A_2)/(1+(x/x_0)^p)$ ，式中： $y$  代表染色面积比； $x$  代表土层深度； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $x_0$ 、 $p$  代表拟合结果的经验系数。

将实测数据与函数拟合值进行对比,分别计算各函数计算值的均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE),表 3 显示, Logistic 函数、线性函数、指数

表 3 不同有机肥施用量样地土壤染色面积比(y)与土层深度(x)拟合参数

Table 3 Regression between soil dyeing area ratio (y) and soil depth (x) in sample plots under different organic fertilizer application rates

函数名称	样地名称	公式	决定系数 R <sup>2</sup>	均方根误差 RMSE	平均相对误差 MRE(%)
Logistic 函数	CK	$y = -8.53 + (96.99 + 8.53) / (1 + (x / 22.28)^{3.63})$	0.986	4.40	49.67
	T1	$y = -23.02 + (97.49 + 23.02) / (1 + (x / 18.07)^{4.62})$	0.997	2.14	22.05
	T2	$y = -77.53 + (97.52 + 52.29) / (1 + (x / 38.35)^{2.18})$	0.992	2.75	17.67
	T3	$y = 12.74 + (99.23 - 12.74) / (1 + (x / 20.49)^{4.59})$	0.995	2.53	15.18
线性函数	CK	$y = 32.69 - 0.27x$	0.955	7.84	80.13
	T1	$y = 29.26 - 0.24x$	0.953	7.96	51.42
	T2	$y = 42.77 - 0.38x$	0.975	5.02	31.52
	T3	$y = 42.91 + 0.38x$	0.953	7.78	38.20
指数函数	CK	$y = 267.61e^{-0.121x}$	0.803	14.93	232.98
	T1	$y = 128.08e^{-0.061x}$	0.837	14.90	287.01
	T2	$y = 192.2e^{-0.073x}$	0.685	10.95	139.55
	T3	$y = 190.55e^{-0.073x}$	0.907	11.41	59.51
二次函数	CK	$y = -0.0011x^2 - 0.16x + 31.42$	0.964	7.05	135.22
	T1	$y = -0.0003x^2 - 0.21x + 28.90$	0.954	7.37	107.59
	T2	$y = -0.0012x^2 - 0.25x + 40.61$	0.981	3.69	20.01
	T3	$y = 0.0017x^2 - 0.55x + 45.55$	0.962	7.28	24.05

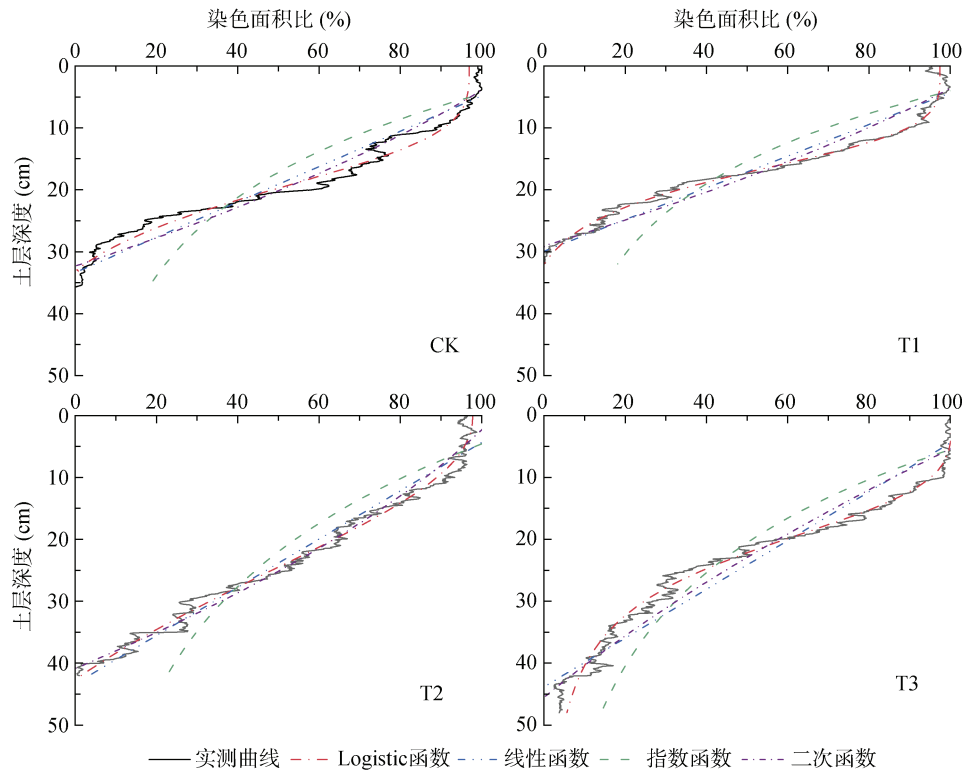


图2 4种函数对土壤染色面积比与土层深度的关系拟合效果图

Fig. 2 Fitting effects of relationship between soil dyeing area ratio and soil depth

函数、二次函数 RMSE 变化范围分别为 2.14 ~ 4.40、5.02 ~ 7.84、10.95 ~ 14.93、7.05 ~ 7.37, MRE 变化范围为 15.18% ~ 49.67%、31.52% ~ 80.13%、59.51% ~ 287.01%、20.01% ~ 135.22%。对比 4 个函数可知, Logistic 函数误差最小, 最接近实测值; 其次为线性函数; 指数函数与二次函数误差较大, MRE 已经大于 100%。因此 Logistic 函数与该地区土壤染色面积比随土层深度变化相符, 可以很好地模拟及预测土壤优先流的染色面积和路径。

### 2.3 残垣沟壑区苹果园土壤优先流特征参数

通过对土壤垂直剖面的染色图像进行数值化解译和计算, 得到了不同有机肥施用量下 4 个样地的长度指数( $L_i$ )、土壤优先流分数( $P_{F-fr}$ )、分形维数( $D$ )、土壤染色形态变异系数(CV)4 个优先流特征指标, 以分析优先流形态特征和发育程度<sup>[25]</sup>。

$L_i$  随有机肥施用量的增加呈增加的趋势(图 3A), 数值集中在 3.65 ~ 4.61。  $P_{F-fr}$  表现为 CK 样地最小, T3 样地最大, 数值在 0.55 ~ 0.68(图 3B)。各样地  $D$  随着有机肥施用量的增加呈现增加的趋势, T3 样地  $D$  最大, 为 1.718, T2、T1、CK 样地分别比 T3 样地小 0.035、0.042、0.050(图 3C)。CV 最大为 CK 样地, 为 0.62, 优先流程度表现为一般发育; 其次为 T1 样地, 为 0.53, 优先流程度表现为一般发育; T2 样地

CV 为 0.38, 优先流程度表现为中等发育; T3 样地的 CV 最小, 为 0.25, 优先流发育程度最高, T3 样地是 CK 样地的 40.32%(图 3D)。

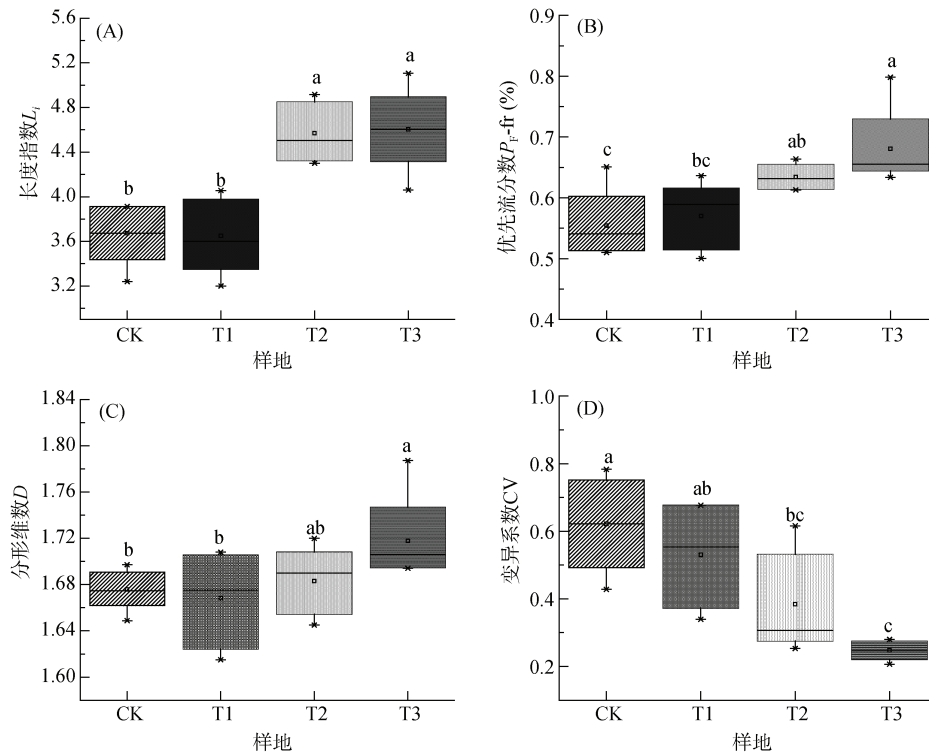
### 2.4 残垣沟壑区苹果园土壤优先流特征指标影响因素

使用 SPSS 对土壤优先流各指标的影响因素进行分析, 表 4 显示容重主要通过影响基质流入渗深度、长度指数、变异系数、土壤优先流比来影响土壤优先流, 容重与变异系数呈显著的正相关( $P < 0.05$ ), 与长度指数呈显著的负相关( $P < 0.05$ ), 与基质流入渗深度、土壤优先流比呈极显著的负相关( $P < 0.01$ )。毛管持水量与变异系数呈显著的负相关( $P < 0.05$ ), 与土壤优先流比呈显著的正相关( $P < 0.05$ )。总孔隙度与平均最大入渗深度、分形维数具有显著相关性( $P < 0.05$ )。

### 2.5 残垣沟壑区苹果园土壤优先流综合评价

使用均方差决策法综合各优先流特征指标对各有机肥施用量果园土壤优先流程度进行评价, 各指标标准化均值、均方差及权重系数见表 5。

不同有机肥施用量样地土壤优先流程度评价结果显示, 各样地土壤优先流指数在 0.27 ~ 0.75, 变异系数为 0.46。除 CK 样地与 T1 样地外, 各样地土壤优先流指数差异明显。T3 样地优先流程度最明显, 其次为 T2 样地, T1 样地排名第三, CK 样地优先流发育程度最弱(图 4)。



(图中不同小写字母表示各样地间差异显著( $P < 0.05$ ))

图 3 不同有机肥施用量样地土壤优先流指标箱线图

Fig. 3 Boxplot plots of preferential flow parameters of sample plots under different organic fertilizer application rates

表 4 土壤优先流特征指标相关性分析

Table 4 Correlation coefficients of preferential flow parameters

	基质流入渗透深度	平均最大入渗深度	长度指数	变异系数	土壤优先流比	分形维数
容重	-0.997**	-0.86	-0.971*	0.986*	-0.993**	-0.846
最大持水量	0.879	0.746	0.705	-0.92	0.867	0.74
最小持水量	0.664	0.242	0.664	-0.671	0.616	0.219
毛管持水量	0.964*	0.789	0.863	-0.981*	0.951*	0.777
非毛管孔隙度	0.635	0.87	0.649	-0.599	0.68	0.872
毛管孔隙度	0.158	0.254	-0.156	-0.25	0.159	0.269
总孔隙度	0.671	0.938*	0.532	-0.682	0.714	0.948*
田间持水量	0.588	0.868	0.573	-0.56	0.637	0.873

注: \*表示在  $P < 0.05$  水平(双侧)显著相关。 \*\*表示在  $P < 0.01$  水平(双侧)显著相关。

表 5 各评价指标标准化均值、均方差及权重系数

Table 5 Standardized mean, mean square deviation and weighted coefficient of each preferential flow parameter

指标	均值 $E(G_j)$	均方差 $\sigma(G_j)$	权重系数 $W(G_j)$
$U_{niFr}$	0.44	0.20	0.15
$D_C$	0.50	0.26	0.21
$L_i$	0.49	0.24	0.17
$P_{F-fr}$	0.36	0.17	0.12
CV	0.58	0.25	0.19
$D$	0.29	0.13	0.10
$U_{max}$	0.17	0.05	0.06

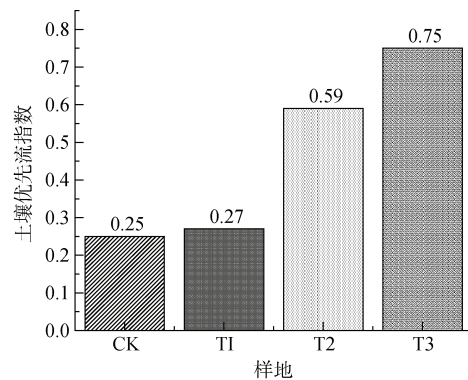


图 4 不同有机肥施用量样地土壤优先流程度评价  
Fig. 4 Assessment of preferential flow of sample plots under different organic fertilizer application rates

### 3 讨论

本文通过对土壤染色面积比与土层深度的关系进行回归分析,发现 Logistic 曲线对土壤染色面积比与土层深度关系拟合效果较好,决定系数较高。而吕刚等<sup>[26]</sup>在排土场土壤优先流研究过程中认为,土壤染色面积比与土层深度的关系可以用线性函数来拟合,拟合效果较好,可用来预测和模拟排土场土壤优先流的染色面积、路径及锋部运动。而本研究发现土壤染色面积比在土壤表层(0 ~ 15 cm)范围内均大于 80%,处于基质流状态,染色面积比下降较慢;而在较深层次的土壤内,染色面积比会急速下降,直至染色面积比降低为 0。这一现象正与 Logistic 曲线相吻合,本研究结果与吕刚等<sup>[26]</sup>的研究结果不一致,可能是由于土壤质地不同而存在的差异。

通过查阅文献发现<sup>[3,24]</sup>,目前对土壤优先流发展程度评价的研究都是使用本研究中使用的 6 个指标中某一个或某几个指标来进行的,6 个指标综合起来能够更全面地反映土壤优先流发展程度。虽然利用染色面积比<sup>[25-26]</sup>、平均最大入渗深度<sup>[27-28]</sup>可以在一定程度上定性描述与定量分析土壤优先流的发展变化状况。但是土壤水流运动的非均匀特征受到多种指标共同的影响<sup>[18]</sup>,仅使用单一的指标并不能准确地对土壤优先流特征进行定量的分析,会使评价结果存在着一定的误差。同时在本研究过程中发现,平均最大入渗深度、优先流染色面积比和长度指数在各样地优先流特征评价中变化规律一致,均表现为 T3>T2>CK>T1;基质流入渗深度、优先流分数、变异系数和分形维数在优先流特征评价中变化相同,表现为 T3>T2>T1>CK。各指标在优先流评价中有着一定的差异性。王发等<sup>[27]</sup>在喀斯特洼地农田土壤优先流评价过程中只考虑到最大染色深度一个指标,认为平均最大入渗深度越大,优先流程度越明显。但是本研究发现,平均最大入渗深度仅仅是优先流特征评价中的一个指标,并不能客观地对优先流特征进行评价,仅使用平均最大入渗深度来评价优先流发展程度会导致评价结果存在着一定的误差。因此,选用多目标决策法中的均方差决策法对几种优先流特征指标进行综合分析能够全方面地对优先流特征进行评价。

本研究发现,随着有机肥施用量的增加,土壤优先流发展程度也呈现出增加的趋势,其主要原因与土壤孔隙度有关。研究表明,有机肥的施用可以增加土壤大孔隙的数量<sup>[29]</sup>。试验地果园使用的是自然生草的林下管理措施,未进行翻耕等处理,人为干扰较小。

有机质含量在直接影响土壤大孔隙的同时,也影响着苹果园林下植被和土壤动物。在试验过程中发现,有机肥施用量越高的样地,林下植被生长状况越好,同时根系也越发达。李文凤等<sup>[30]</sup>及刘目星等<sup>[31]</sup>在研究中发现,林下植被的根系生长及植被的分解对土壤孔隙发育有着促进的作用。闫佳亮等<sup>[32]</sup>在农田土壤优先流的研究过程中发现,土壤动物对土体的扰动不仅增加土壤大孔隙含量,同时也极大促使优先流的产生。而有机肥施用量是影响土壤动物的一个主要因素<sup>[33]</sup>。因此,优先流发展程度表现出随着有机肥的施用量增加而增加的趋势。果园优先流发育程度评价结果表明,施 9 000 kg/hm<sup>2</sup> 有机肥(T2)样地优先流特征指数数值增加幅度最大,为 0.32,对土壤优先流发育影响最为明显;T3 与 T1 样地增长幅度较小,分别为 0.02、0.16。因此 T3 样地是能够促进优先流发育的最佳施肥量。

目前学者普遍认为,优先流的存在会导致土壤养分流失及地下水污染的情况,然而,黄土残源沟壑区果园仅靠天然降雨供水,且耗水强度和耗水深度都大于一般农作物,因此会存在土壤干燥化的现象<sup>[34-35]</sup>。研究表明,黄土塬区苹果园雨水入渗深度为 2 ~ 3 m<sup>[36]</sup>,不会对地下水产生影响。在降雨过程中优先流是补给土壤水分的主要机制。因此优先流的存在对土壤干燥化现象有着一定的消除作用<sup>[37-38]</sup>。

### 4 结论

1)不同有机肥施用量样地土壤染色面积比随土壤深度的变化状况可以使用 Logistic 曲线进行拟合,拟合效果较好,决定系数  $R^2$  均大于 0.986。

2)研究过程中选用的优先流特征指标中的基质流入渗深度、优先流分数、变异系数和分形维数能在一定程度上反映出土壤优先流的发育程度,优先流发展程度表现为 T3>T2>T1>CK;但平均最大入渗深度、优先流区染色面积比和长度指数在评价优先流程度中结果有些偏差,优先流发展程度表现为 T3>T2>CK>T1。

3)利用均方差决策法得到的优先流指数由大到小为:T3(0.75)、T2(0.59)、T1(0.27)、CK(0.25),随着施肥量的增加,优先流程度也随之增加。

### 参考文献:

- [1] 齐登红, 靳孟贵, 刘延锋. 降水入渗补给过程中优先流的确定[J]. 地球科学, 2007, 32(3): 420-424.
- [2] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a



- texture-contrast soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 398(3/4):191–201.
- [3] Gumm L P, Bense V F, Dennis P F, et al. Dissolved noble gases and stable isotopes as tracers of preferential fluid flow along faults in the Lower Rhine Embayment, Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(1): 99–108.
- [4] Harpold A A, Lyon S W, Troch P A, et al. The hydrological effects of lateral preferential flow paths in a glaciated watershed in the northeastern USA[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(2): 397–414.
- [5] 石素梅. ERT 与染色示踪方法在土壤入渗监测中的应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.
- [6] 罗嗣海, 罗涛, 王观石, 等. 离子型稀土矿体中溶液非均匀性渗透对浸取率的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 421–427.
- [7] 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等. 土壤优先流研究现状与发展趋势[J]. *土壤*, 2012, 44(6): 905–916.
- [8] Merdun H. Using TDR and modeling tools to investigate effects of interactive factors on preferential flow and transport in field sandy clay soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(4): 1821–1838.
- [9] Stumpp C, Maloszewski P. Quantification of preferential flow and flow heterogeneities in an unsaturated soil planted with different crops using the environmental isotope  $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(3/4):407–415.
- [10] 张东旭, 张洪江, 程金花. 基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 214–220, 277.
- [11] 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*, 2014, 28(4): 263–268.
- [12] 张勇勇, 富利, 赵文智, 等. 荒漠绿洲土壤优先流研究进展[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(6): 1189–1195.
- [13] 张文杰, 严宏罡, 孙毓. 城市生活垃圾中优先流规律的穿透试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(7): 1316–1321.
- [14] 刘贤赵, 康绍忠. 黄土区考虑滞后作用的坡地水量转化模型[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1): 16–23.
- [15] 肖自幸, 朱蔚利, 牛健植, 等. 鹫峰国家森林公园不同林分下土壤优先流现象研究[J]. *湖南农业科学*, 2011(17): 118–121.
- [16] 郑欣, 程金花, 张洪江, 等. 北京地区 2 种类型土壤优先流染色形态特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 113–119, 131.
- [17] 陈晓冰, 严磊, 陈廷速, 等. 西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 58–66.
- [18] 张永. 渭北黄土高原林—草景观界面植被、土壤特征及其关系研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [19] 张万儒. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [20] 李胜龙, 易军, 刘目兴, 等. 稻田—田埂过渡区土壤优先流特征研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1131–1142.
- [21] van Schaik N L M B. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *CATENA*, 2009, 78(1):36–47.
- [22] Bargués Tobella A, 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, 50(4): 3342–3354.
- [23] 易鹏涛, 赵俊三, 易鹏飞, 等. 基于均方差决策分析法的滇中城市群土地资源综合承载力评价研究[J]. *软件*, 2018(3): 181–186.
- [24] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 477–488.
- [25] 杜晓晴, 牛健植, 侯琨, 等. 华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(3): 51–57.
- [26] 吕刚, 傅昕阳, 李叶鑫, 等. 海州露天煤矿复垦排土场不同土地利用土壤优先流特征研究[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 37–51.
- [27] 王发, 付智勇, 陈洪松, 等. 喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 111–116.
- [28] 陈晓冰, 张洪江, 李世友, 等. 紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(6): 42–49.
- [29] 孙梅. 长期施用有机肥旱地红壤孔隙的分布与变化特征[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [30] 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.
- [31] 刘目兴, 杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 871–880.
- [32] 闫加亮, 赵文智, 张勇勇. 绿洲农田土壤优先流特征及其对灌溉量的响应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1454–1460.
- [33] 孔云. 施肥措施和秸秆还田对潮土农田土壤动物的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [34] 刘贤赵, 衣华鹏, 李世泰. 渭北旱塬苹果种植分区土壤水分特征[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2055–2060.
- [35] 张社红, 李军, 王学春, 等. 渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟[J]. *生态学报*, 2011, 31(13): 3767–3777.
- [36] 王石言. 黄土塬区苹果园土壤水文特征及蒸散规律[D]. 陕西杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [37] 徐学选, 张北赢, 田均良. 黄土丘陵区降水—土壤水—地下水转化实验研究[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 16–22.
- [38] 徐学选, 陈天林. 黄土土柱入渗的优先流试验研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 82–85.