

网络出版时间:2013-05-02 10:22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130502.1022.002.html>

北京市昌平区农地土壤大孔隙形成的影响因素分析

王彬俨,程金花,张洪江,孙 龙,王 贤,沙 京

(北京林业大学 水土保持学院,北京 100083)

【摘 要】 【目的】探讨影响土壤大孔隙形成的主要因素。【方法】利用土壤水分穿透曲线法对北京市昌平区农地的土壤大孔隙数量特征进行分析,确定了大孔隙数量的潜在影响因素,包括根系密度、土壤质地、土壤结构(水稳性团聚体)、有机质含量,并利用典型相关分析,研究了各因素对大孔隙率的影响。【结果】根系密度、土壤质地和水稳性团聚体对大孔隙的形成均存在显著影响;根系密度与大孔隙率呈极显著正相关关系($P<0.01$),根系密度对大孔隙的影响主要在于根对土壤的机械力作用以及环形根孔本身作为大孔隙的一部分对大孔隙率的直接贡献;土壤质地对大孔隙形成的影响主要在于粉粒含量的变化,粉粒含量与大孔隙率呈显著负相关关系($P<0.05$),砂粒和黏粒含量对大孔隙率的影响不显著;土壤水稳性团聚体含量与大孔隙率呈显著正相关关系($P<0.05$),但二者之间的关系又主要受有机质含量的影响。【结论】土壤大孔隙形成的主要影响因素为植物根系密度、粉粒含量和有机质含量。

【关键词】 农地;土壤大孔隙;影响因素;优先流

【中图分类号】 S152.5

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)05-0081-06

Factors influencing the macropores properties of agricultural land in Changping District, Beijing

WANG Bin-yan, CHENG Jin-hua, ZHANG Hong-jiang, SUN Long, WANG Xian, SHA Jing

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 This study explored the factors that affect the formation of macropores. 【Method】 Using water breakthrough curves, the amount of macropores of agricultural land in Changping District were calculated. Potential effecting factors, including root density, soil texture, aggregates content and organic content were selected. Canonical correlation analysis was used to study the relationship between these factors and macropore proportions. 【Result】 Root density had a very significant positive correlation with macropores content ($P<0.01$), root density mainly affected macropores by having mechanical forces to soil and directly providing ring-shaped channel around roots. In terms of soil texture, silt particle content had a significant negative correlation with macropores content ($P<0.05$), while sand and clay particle contents played less important roles. Aggregates content had a significant positive correlation with macropores content ($P<0.05$), and the connection between them mostly depended on the content of organic matter. 【Conclusion】 The formation of macropores was significantly impacted by root density, silt particles content and aggregates content.

Key words: agricultural land; soil macropores; influential factors; preferential flow

【收稿日期】 2012-07-30

【基金项目】 国家自然科学基金项目(41271300, 30900866); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD38B0403)

【作者简介】 王彬俨(1988—), 男, 四川宜宾人, 在读硕士, 主要从事水土保持研究。E-mail: wangbinyan_1123@126.com

【通信作者】 程金花(1979—), 女, 山东东阿人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与植被恢复研究。
E-mail: jinhua_cheng@126.com

优先流是一种常见的土壤水分运动形式,用于描述在多种环境条件下发生的非平衡流过程^[1-2]。优先流的表现形式很多,大孔隙流作为其中的一种主要形式,在许多土壤环境中普遍存在^[3]。大孔隙流是指水分和溶质绕过土壤基质,通过大孔隙迁移,到达深层土壤甚至是地下水的过程^[4-5]。由于这一作用机制一方面会导致地表水分快速流到根区以下,削弱灌溉和降水对土壤水分的补偿作用;另一方面,对于水分运输较慢的区域,其溶质运移也相对缓慢,这将可能导致施肥、农药和除草剂在农地上的施用效果降低,从而不仅可能造成地表土壤因为缺少养分补充而贫瘠,也可能造成地下水质的恶化^[6-9]。因此,农地优先流的研究,对于农业措施管理和水资源保护有着十分重要的意义。

大孔隙流的产生受许多因素的影响。Beven 等^[10]发现,大孔隙流在粉砂和黏质土壤中更容易出现,相比之下,沙质土壤中孔隙显得更均匀,大孔隙流现象不明显。Aubertin^[11]提出,大孔隙流的成因包括根系活动、动物活动、冻融与干湿交替、土壤可溶性物质、土壤团聚体和土壤侵蚀等。Gish 等^[12]通过长期观测与试验发现,免耕虽然在短期内不能像翻耕一样显著提高大孔隙数量,但翻耕过程中土壤会被机械压实,连续多年耕作后,免耕反而可以增加土壤中的大孔隙数量,提高土壤的渗透性。在国内,Cheng 等^[13]通过染色示踪法研究优先路径分布特征,发现直径 ≤ 5 mm 的根系对大孔隙流有重要影响。陈效民等^[14]依靠测定水稻土的水分穿透曲线及相关土壤基本性质,认为有机质含量和土壤黏粒含量是影响大孔隙形成的主要因素。除此之外,其他研究甚少涉及大孔隙的影响因素,而且在有关研究中,团聚体未被纳入讨论和分析。因此,本研究对北京市昌平区农地土壤的大孔隙特征及其影响因素(根系密度、土壤质地、土壤结构(水稳性团聚体)、有机质含量)进行分析,以期为该地区的水资源保护和农业措施管理提供一定的理论依据。

1 研究区概况

本研究区位于北京市昌平区马池口镇亭子庄村,地理坐标东经 $115^{\circ}50'17''$,北纬 $40^{\circ}02'18''$ 。该地处温榆河冲积平原和燕山、太行山支脉的结合地带,属温带季风区,半湿润大陆性季风气候。春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽,冬季寒冷干燥,四季分明。年平均日照时数 2 684 h,年平均气温 11.8°C ,降雨多集中在 6—9 月,年平均降水量 550.3

mm。区内土壤为第四级冲积物上形成的厚层潮土,适宜种植各种农作物。

2 研究方法

2.1 土样采集

研究采样点位于轻工业环境保护研究所生态修复实验基地内,采样时间为 2011-10-26—30,实验农地种植的作物为玉米,采样时玉米已经收割。

前期针对大孔隙分布特征进行的染色示踪试验显示,亮蓝染料 24 h 的自然下渗深度为 30~40 cm,因而选择实验地 0~40 cm 土层土壤为研究对象,将其按 10 cm 间隔厚度等分为 0~10,10~20,20~30,30~40 cm 共 4 个土层。由于染色示踪试验将各土层分为了染色区和未染色区,因此,每层分别用高 4 cm、直径 9 cm 的取土环刀取 2 个原状土样,染色区和未染色区各 1 个,用于水分穿透试验。之后在每层土壤染色区和未染色区中分别进行多点取样,取样后将土壤各自混合,用于土壤基本性质的测定。将染色区和未染色区分别标记为土壤样本 1 和样本 2。

2.2 大孔隙率的计算

采用基于水力学理论的穿透曲线法对土壤中的大孔隙进行量化估算^[15]。由于本研究将大孔隙定义为田间持水量到饱和含水量之间的土壤孔隙,因此具体的孔隙半径范围可通过试验获得。将环刀取得的原状土样浸泡在清水中使之饱和,随后放置 12 h 使其含水量达到田间持水量。将土样放入土壤水分渗透仪(ST70A,中国)中,用马氏瓶控制水头高度为 4 cm,当土柱下端有水流出时,每隔 5 s 收集出流量,直到水流通量达到稳定为止。

土壤达到田间持水量后,其基质势接近为 0,水分渗透速率主要受供水强度控制。而当水流通量稳定时,则表示土壤含水量达到饱和。本研究重点讨论的就是在土壤含水量达到田间持水量之后,经过水分穿透试验并最终饱和的这个过程。由于土壤水分运动速率较慢,处于层流的范围。因此,在假设土壤孔隙为圆形的情况下,根据水分穿透曲线理论,将流量方程:

$$Q = Av = \pi r^2 \tau L / t, \quad (1)$$

与 Poiseuille 方程:

$$Q = \pi r^4 \Delta P / (8 \eta \tau L), \quad (2)$$

联合求解,得到大孔隙当量孔径:

$$r = \tau L [8 \eta / (t \Delta P)]^{1/2}. \quad (3)$$

式中: Q 为单位流量(cm^3/s); A 为土壤中单个孔隙

的横截面积(cm^2); v 为孔隙中水流的流速(cm/s); r 为孔隙半径(cm); τ 为水流实际路径与土柱长度的比值,一般取 1.2; L 为土柱长度(cm); t 为从第 1 次加水开始计时的时间(s); η 为水的黏滞系数($\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$); ΔP 为压力水头(cm)。

因此,通过对任意时间出流量进行观测,利用(3)式计算出相应的孔隙半径,按照一定间隔在 2 个孔隙半径间划分出孔隙范围,以其平均值作为计算值,当间隔出流量为 Q_e 时,可得到如下关系式:

$$Q_e=nAv=n\pi r^2\tau L/t。$$

(4)

将(4)式进行变形,得到大孔隙数量 n 的计算式:

$$n=Q_e t/(\pi r^2\tau L)。$$

(5)

计算得到大孔隙数量 n 之后,根据各孔径范围内大孔隙数量,利用加权平均法得到大孔隙率 C 的计算式:

$$C=\sum_{i=1}^n(n_i\cdot r_i^2)/R^2。$$

(6)

式中: C 为大孔隙率($\%$); r_i 为孔隙半径范围平均值(cm); n_i 为该半径范围内大孔隙个数; R 为取土环刀的半径(cm)。

2.3 土壤基本性质与根系密度的测定

采用常见方法测定土壤基本性质。用比重计法测土壤质地,质地分类采用国际制^[16];用人工筛分法测定土壤结构^[17];用重铬酸钾法测定有机质含量^[18]。此外,在采集土样时,收集各土层中的所有根系,并带回实验室测量其总长,计算根系密度。

2.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 和 Excel 2007 软件进行分析和制图,统计方法采用 SPSS 软件中的 Canonical Correlation 函数进行典型相关分析,在必要的时候则进行控制变量条件下的偏相关分析。

表 2 2 种供试农地土壤的基本性质

Table 2 Basic characteristics of experimental soils

土样 Samples	土层深度/cm Soil depth	根系密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$) Root denisty	砂粒/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Sand	粉粒/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Silt	黏粒/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Clay	水稳性团聚体/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Aggregates	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Organic matter
1	0~10	263.96	465.31	397.96	136.73	462.80	10.57
	10~20	345.08	444.90	418.37	136.73	503.20	9.93
	20~30	151.04	363.40	479.63	156.97	461.60	9.31
	30~40	37.72	429.69	448.78	121.53	255.20	8.96
2	0~10	108.28	439.90	428.37	131.73	238.40	10.01
	10~20	96.24	364.00	455.96	180.05	492.40	9.91
	20~30	54.76	328.60	511.88	159.52	232.80	9.24
	30~40	29.40	404.69	478.78	116.53	214.40	8.75

3.2 不同因素对土壤大孔隙形成的影响

3.2.1 根系密度 根系除了其分泌物对大孔隙形成有促进作用外,根系本身对大孔隙的形成也存在

3 结果与分析

3.1 农地土壤大孔隙数量特征及影响因素的确定

采用水分穿透试验,获得农地土壤大孔隙的数量特征^[19]。其中,大孔隙的孔径为 0.5~2.8 mm,在此范围内,按照各孔径的数量及其数量级的变化,又进一步细划为 $\geq 0.5\sim\leq 0.7$, $> 0.7\sim\leq 1.0$, $> 1.0\sim\leq 1.5$, $> 1.5\sim\leq 2.0$ 和 $> 2.0\sim\leq 2.8$ mm 共 5 个范围。根据各孔径范围中大孔隙的数量,通过加权平均法计算得到各土样的大孔隙率,结果见表 1。从表 1 可以看出,因土层和取样点不同,该农地土壤的大孔隙率为 6.51%~22.06%,变化幅度较大。与其他土层相比,0~20 cm 表土层的大孔隙率明显较高,其中又以 10~20 cm 土层最高,大孔隙率最高值达到 22.06%,之后随着土壤深度的增加而降低。

表 1 农地不同层次土壤剖面的大孔隙率

Table 1 Macroporosity of soil profiles

at different layers %

土样 Samples	土层深度/cm Soil depth			
	0~10	10~20	20~30	30~40
1	18.83	22.06	15.48	12.35
2	13.65	14.70	7.56	6.51

土壤质地、土壤结构、有机质含量等诸多因素都会对土壤大孔隙的形成和发育产生影响。本研究选取根系密度、土壤质地、土壤结构(水稳性团聚体)、有机质含量共 4 类指标作为潜在影响因素加以分析。对于其他土壤指标,如饱和导水率和土壤孔隙度,由于前者是受大孔隙率的显著影响,并不能对大孔隙率造成影响;后者则是受土壤质地的影响^[20],但本研究已经将土壤质地作为潜在影响因素,故未对这 2 个指标进行分析。试验农地中影响大孔隙形成的土壤基本性质如表 2 所示。

表 2 2 种供试农地土壤的基本性质

Table 2 Basic characteristics of experimental soils

土样 Samples	土层深度/cm Soil depth	根系密度/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$) Root denisty	砂粒/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Sand	粉粒/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Silt	黏粒/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Clay	水稳性团聚体/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Aggregates	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Organic matter
1	0~10	263.96	465.31	397.96	136.73	462.80	10.57
	10~20	345.08	444.90	418.37	136.73	503.20	9.93
	20~30	151.04	363.40	479.63	156.97	461.60	9.31
	30~40	37.72	429.69	448.78	121.53	255.20	8.96
2	0~10	108.28	439.90	428.37	131.73	238.40	10.01
	10~20	96.24	364.00	455.96	180.05	492.40	9.91
	20~30	54.76	328.60	511.88	159.52	232.80	9.24
	30~40	29.40	404.69	478.78	116.53	214.40	8.75

重要的物理学影响。有研究指出,根系本身在土壤中发展形成的根孔主要有 3 种形式:有根生长的根孔、根已腐坏的空根孔、根已腐坏但又被新生根占据

的根孔,并且 3 种根孔形式都可以成为大孔隙流的通道^[21]。本研究主要讨论的是第 1 种形式的根系,并以单位体积根系长度,即根系密度作为衡量指标。

通过典型相关分析,根系密度与大孔隙率之间呈极显著正相关关系(Pearson 相关系数 $r=0.912$, 概率值 $P<0.01$),其线性回归结果如图 1 所示。由图 1 可知,根系密度越高,大孔隙率也就越大。根系密度对大孔隙形成的促进作用主要表现在以下 3 个方面:第一,根系分泌物有助于根系周围有机质含量的提升,而有机质又为土壤团聚体的形成提供了胶体,进而促进了大孔隙率的提高。第二,从横截面上看,根系并不是与周围的土壤致密连接,而是存在一个环形空间,由于根的直径会因为温度、湿度或者外部拉力的原因而变大或变小,因此这个空间的大小也会随之产生相反的变化。有研究发现,根的直径在下午日照最强烈时可缩小 60%^[22]。由此可见,根系生长的通道本身就可以认为是大孔隙的一部分,根系生长越密集,大孔隙数量就越容易升高。第三,根系生长时还会对土壤产生分割和挤压等机械力作用,也会改变土壤的孔隙状况,例如一些块状土体的碎裂和一些微团聚体的黏结聚合。

为了探讨根系对大孔隙形成的促进作用,在消除有机质影响的条件下,对根系密度和大孔隙率进行偏相关分析,结果显示,根系密度和大孔隙数量之间呈显著正相关关系(Pearson 相关系数 $r=0.823$, 概率值 $P<0.05$)。这说明根系对大孔隙形成的影响主要在于以上 3 方面中的后 2 个方面,即机械力对土壤进行切割挤压、进而改变孔隙状况,以及根系生长通道本身作为大孔隙的一部分对大孔隙率在数量上的直接贡献。根系通过分泌物提高有机质含量而促进大孔隙形成的作用反而十分有限。

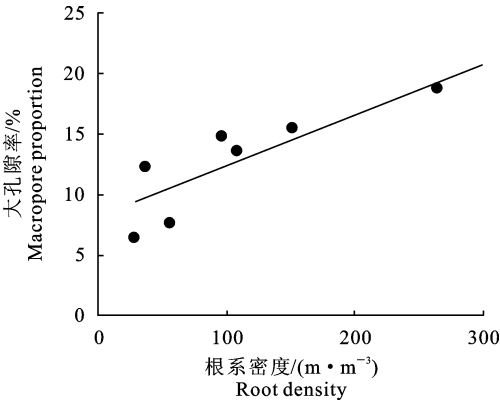


图 1 根系密度与大孔隙率的关系

Fig. 1 Relationship between root density and macropore proportion

3.2.2 土壤质地 土壤质地是指土壤中各种大小颗粒的相对比例,它主要受成土母质类别和特点的影响,但对于农地而言,人为活动的干扰同样不可忽略。一般而言,土壤颗粒越细小,堆积垒结之后形成的土壤孔隙也就越小,这样就会降低土壤中的大孔隙数量。

通过典型相关分析,土壤质地中,粉粒含量与大孔隙含量之间呈显著负相关关系(Pearson 相关系数 $r=-0.779$, 概率值 $P<0.05$);砂粒含量与大孔隙率之间的关系不明显(Pearson 相关系数 $r=0.546$, 概率值 $P>0.1$);黏粒含量与大孔隙率之间的相关性不显著(Pearson 相关系数 $r=0.123$, 概率值 $P>0.5$)。由此可知,土壤质地中的粉粒含量在大孔隙的形成与分布过程中发挥了较大的作用,而砂粒和黏粒的作用不明显。将粉粒含量与大孔隙率进行线性回归,得到二者的回归曲线如图 2 所示。

由图 2 可见,粉粒含量越高,大孔隙率越低。造成这一结果的原因主要有:首先,黏粒是造成土壤颗粒间孔隙小、通透性低的最主要因素,但潮土的黏粒含量普遍偏低,这就造成黏粒对大孔隙形成的阻碍非常有限,本研究中供试土样的黏粒含量最高值也仅为 180.05 g/kg,甚至不足土壤颗粒总量的 20%,因而表现为黏粒对大孔隙的影响不显著;其次,砂粒的颗粒粗、比表面小,颗粒间孔隙较大,通气透水能力普遍良好,但如果这些孔隙被粉粒和黏粒填充,就会造成土壤孔隙的缩小,并最终导致大孔隙数量的降低。本研究中,粉粒含量大致呈现出随土壤深度增加而增大的趋势,增加的土壤粉粒填充了更多的土壤孔隙,因而导致下层土壤的大孔隙率较上层低;同时,砂粒含量的增加并未必然导致大孔隙率的提高也可以从中得到解释。

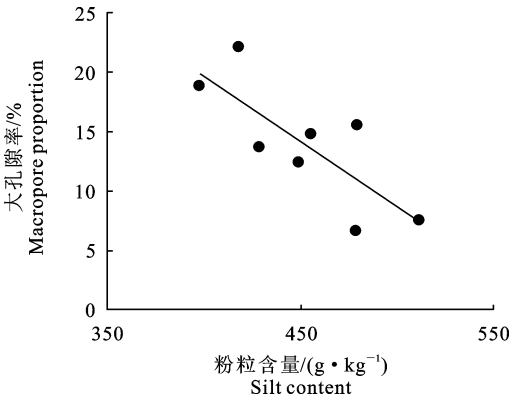


图 2 粉粒含量与大孔隙率的关系

Fig. 2 Relationship between silt particle content and macropore proportion

3.2.3 土壤结构与有机质 通常土壤中的固体颗粒很少以单粒存在,大多是多个单体土粒因为各种因素相互黏合形成大小和性状有所不同的团聚体。因此,团聚体的产生和排列状况,必然会改变土壤的孔隙状况,故本研究选取水稳性团聚体作为代表土壤结构的指标。团聚体的形成受许多因素影响,如干湿交替、冻融交替、有机质含量、土壤动物活动、根系切割土壤等因素都可以促进或阻碍团聚体的形成,而其中又以土壤动植物活动与有机质含量为主要影响因素^[23]。由于这些因素大多难以进行单独量化,因此团聚体含量的高低也可以被认为是这些因素影响大孔隙形成的综合反映。

通过典型相关分析,水稳性团聚体含量与大孔隙率之间呈显著正相关关系(Pearson 相关系数 $r=0.831$, 概率值 $P<0.05$),其线性回归结果如图 3 所示。由图 3 可知,水稳性团聚体含量越高,大孔隙率也相应增大。导致这一结果的原因主要有以下几点:第一,干湿交替促进了团粒的形成。潮土的地下水位普遍较高,据调查,实验农地的地下水位在 2.5 m 以内,而在夏季暴雨季节,这一水位有时会上涨至 1 m 以内甚至接近地表,干湿交替使得土块中的胶体在胀缩过程中产生不均衡压力,有利于土块的

崩裂和分割,最终形成小的团粒。第二,丰富的土壤动植物活动促进团聚体的形成。在土样采集时,4 个土层中共出现动物活动留下的虫孔 52 处,由于其连通性难以判断,故不进行详细讨论,但动物活动产生的团粒和增加的有机质都可以提高团聚体含量,而根系的分泌物及其死亡分解后形成的腐殖质同样是通过增加有机质的方式提高团聚体含量。第三,有机质的存在有利于团聚体形成,除动植物分泌物可以提高有机质含量外,农业施肥也是有机质的重要来源。通过典型相关分析,有机质含量与大孔隙率之间呈显著正相关关系(Pearson 相关系数 $r=0.741$, 概率值 $P<0.05$),其线性回归结果如图 4 所示。由图 4 可知,有机质含量越高,大孔隙也就相应增加。这主要是由于有机质可以为团聚体黏合过程提供必要的胶体物质,并且相比于硅酸盐黏粒等无机胶体,有机胶体的来源更广泛。此外,如果消除有机质的影响,再对水稳性团聚体含量与大孔隙率进行偏相关分析,那么二者的相关性就变得不显著(Pearson 相关系数 $r=0.714$, 概率值 $P>0.05$)。由此可见,水稳性团聚体对于促进大孔隙的形成发挥着非常重要的作用,而这一作用又主要依靠有机质含量的变化而实现。

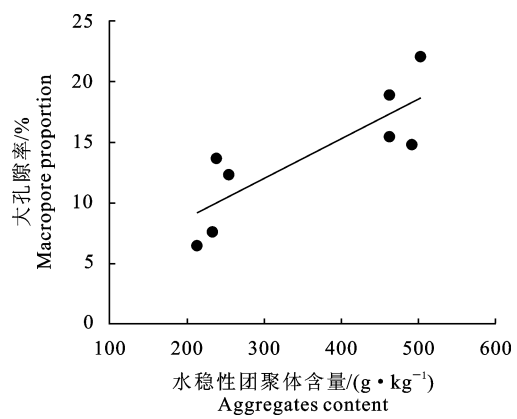


图 3 水稳性团聚体与大孔隙率的关系

Fig. 3 Relationship between aggregates and macropore proportion

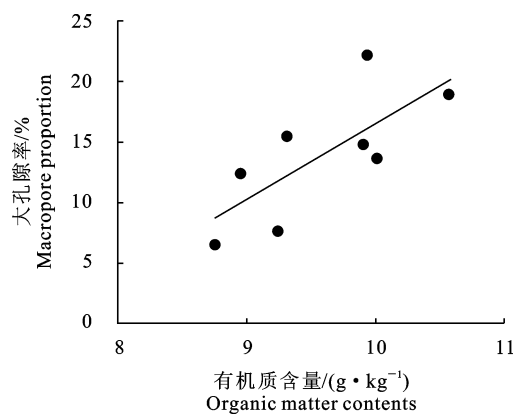


图 4 有机质含量与大孔隙率的关系

Fig. 4 Relationship between organic content and macropore proportion

4 结 论

本研究在对北京市昌平区农地土壤大孔隙数量特征初步认识的基础上,讨论了该区内土壤基本性质和植物根系对大孔隙形成的影响,结果发现:

1)根系密度对大孔隙率的影响较大,二者呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数 $r=0.912$,这种影响主要体现为根系生长时对土壤产生切割、挤压等机械力作用,以及根系生长通道本身作为大孔

隙的一部分对大孔隙率在数量上的直接贡献。

2)土壤质地对大孔隙形成的影响主要在于粉粒含量的变化,粉粒含量与大孔隙含量呈显著负相关关系($P<0.05$),相关系数 $r=-0.779$;土壤黏粒由于含量偏低,因此影响反而很小。

3)水稳性团聚体含量对大孔隙的形成有影响,二者呈显著正相关关系($P<0.05$),相关系数 $r=0.831$,而这种影响又主要依赖于有机质含量的大小,在黏合团聚过程中有机质提供黏结胶体,是该环

节中最重要的影响因素。

[参考文献]

[1] Flury M, Flühler H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 1945-1954.

[2] Wang Z, Feyen J, Ritsema C J. Susceptibility and predictability of conditions for preferential flow [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(9): 2169-2182.

[3] Hornberger G M, Germann P F, Beven K J. Throughflow and solute transport in an isolated sloping soil block in a forested catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 124(1/2): 81-99.

[4] Bouma J, Belmans C F M, Dekker L W. Water infiltration and redistribution in a silt loam subsoil with vertical worm channels [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 917-921.

[5] Beven K, Germann P. Water flow in soil macropores: II. A combined flow model [J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(1): 15-29.

[6] Lennartz B, Michaelsen J, Widmoser P, et al. Time variance analysis of preferential solute movement at a tile-drained field site [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(1): 39-47.

[7] Paasonen-Kivekäs M, Koivusalo H, Karvonen T, et al. Nitrogen transport via surface and subsurface flow in an agricultural field [M]. Birmingham: IAHS Publ, 1999.

[8] Stamm C, Flühler H, Gächter R, et al. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(3): 515-522.

[9] Toiber-Yasur I, Rosner M, Hadas A, et al. Leaching of terbutylazine and bromacil through field soils [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1999, 113(1/2/3/4): 319-335.

[10] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.

[11] Aubertin G M. Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement [R]. Upper Darby, Pennsylvania: US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 1971.

[12] Gish T J, Coffman C B. Solute transport under no-till field corn [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1358-1363.

[13] Cheng J H, Zhang H J, Wang W, et al. Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in southwest China [J]. *Soil Science*, 2011, 172(12): 652-660.

[14] 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 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 509-512.

Chen X M, Huang D A, Wu H S. Characteristics of macropores and their affecting factors of major paddy soils in Taihu lake region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 509-512. (in Chinese)

[15] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(2): 556-559.

[16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定法 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 53-56.

Nanjing Institution of Soil, CAS. Method for determination of soil physical properties [M]. Beijing: Science Press, 1978: 53-56. (in Chinese)

[17] 林大仪. 土壤学实验指导 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 70-73.

Lin D Y. Soil science experiment instruction [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004: 70-73. (in Chinese)

[18] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 132-136.

Nanjing Institution of Soil, CAS. Soil physical and chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978: 132-136. (in Chinese)

[19] 王彬俨, 程金花, 张洪江, 等. 北京昌平区农地土壤大孔隙特征 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 189-193.

Wang B Y, Cheng J H, Zhang H J, et al. Macropores properties of agricultural land at Changping district in Beijing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 189-193. (in Chinese)

[20] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 208.

Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 208. (in Chinese)

[21] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability [J]. *Bioscience*, 2011, 61(11): 869-879.

[22] Huck M G, Klepper B, Taylor H M. Diurnal variations in root diameter [J]. *Plant Physiology*, 1970, 45(4): 529-530.

[23] 孙向阳. 土壤学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 126-127.

Sun X Y. Soil science [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 126-127. (in Chinese)