

# 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源

何丹<sup>1,2</sup>, 马东豪<sup>2</sup>, 张锡洲<sup>1</sup>, 张佳宝<sup>2</sup>, 郑子成<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学资源与环境学院, 四川 成都 611130;

2. 中国科学院南京土壤研究所封丘农田生态系统国家试验站, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 以封丘地区典型的4种土地利用类型(传统耕地、免耕地、金银花地和杨树林地)为例, 系统研究了不同土地利用方式下土壤入渗特性的空间变异强度、空间变异结构及其主要变异源。结果表明, 频繁的耕作会降低土壤异质性, 弱化土壤特性空间变异结构, 扰动较小的免耕地和金银花地的土壤入渗特性则具有相对明显的空间变异结构, 扰动最小的杨树林地土壤的入渗特性具有最为明显的空间变异结构和最小的变程。容重、有机质含量和初始含水量是耕地入渗的最主要变异源, 初始含水量则是金银花地入渗的唯一显著性变异源; 杨树林地入渗变异的主要变异源是有机质和初始含水量; 影响免耕地入渗特性变异的变异源并不显著。在有些情况下, 水温也可能成为入渗特性空间变异研究的重要干扰因素。

**关键词:** 土地利用; 土壤入渗; 空间变异; 变异源

**中图分类号:** S152.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2013)03-0340-09

入渗是陆地表面最重要的水分交换过程之一, 是由土壤水力特性、水分状况以及供水条件等因素综合作用的结果。在自然条件下, 土壤异质性普遍存在, 人类活动引起的土地利用方式的变化也强烈地影响着下垫面土壤特性<sup>[1]</sup>, 由此决定的土壤水分入渗过程表现出很大的时空变异性<sup>[2]</sup>和尺度依赖性<sup>[3]</sup>, 这给水文模型的参数化以及土壤水文过程的模拟带来很大的难度和不确定性<sup>[3]</sup>。认识土壤入渗特性和土壤物理特性的空间变异规律及其相互关系, 以及不同土壤、植被类型和耕作条件下的变异源对于准确模拟空间入渗过程具有重要意义。

在对田间入渗空间变异的研究中, 多是通过土壤入渗参数或水力参数(如饱和导水率和稳渗率等)的空间变异来研究入渗的空间变异规律。目前, 人们对于土壤水力特性的时空变异规律以及地貌、植被、耕作管理等对土壤导水率、容重和孔隙度等因素的影响已经取得较深入的认识<sup>[4-5]</sup>。由于传统方法在大面积测定土壤水力特性参数方面存在的困难, 土壤水力特性参数的点面转换<sup>[6]</sup>以及基于尺度依赖性特征联系土壤水力特性和基本土壤特性之间的转换函数<sup>[7-8]</sup>研究也一直是近年的研究热点。尽管如此, 对于土壤入渗特性空间变异规律及变异源的研究仍远不能满足流域水文模型对非均质下垫面入渗过程模拟的需求。

影响田间土壤入渗变异的因素很多。在土壤水分状况和供水条件一致的情况下, 土壤的入渗能力主要取决于土壤水力特性。土壤水力特性主要是土壤孔隙结构(孔隙体积和孔隙尺寸分布)的间接反映, 因此与土壤孔隙结构形成和发育有关的因素(土壤质地、容重和有机质含量等)都可能成为土壤水分入渗的变异源<sup>[9]</sup>。这些因素又受到农田耕作和管理方式、植被类型、生物活动、雨滴击溅、干湿和冻融交替等人类活动和自然过程的强烈影响<sup>[10-11]</sup>。此外, 由于入渗理论在描述田间入渗方面存在的一些问题以及参数获取方法前提假设或理论上的局限, 往往很难剔除初始含水量的影响。并且, 空间变异研究的田间试验量往往很大, 试验时间跨度也相对较大, 环境因子的变异和波动也会增加研究结果的不确定性。

**收稿日期:** 2012-07-06; **网络出版时间:** 2013-03-27

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130327.1514.013.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50909090); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB100506)

**作者简介:** 何丹(1985-), 女, 四川广安人, 硕士, 主要从事土壤生态研究。E-mail: hedan0820@gmail.com

**通信作者:** 马东豪, E-mail: dhma@issas.ac.cn

人类活动强烈地改变着陆地状况,作为一种高强度的干扰因素长期持续地影响着下垫面土壤特性。土地利用方式不仅直接影响着土壤入渗特性,而且也影响着与之相关的诸多土壤基本物理特性<sup>[9, 12-14]</sup>。虽然关于土地利用方式对土壤物理特性及水力特性影响的研究已有较多的报道,但研究多集中于对这些指标绝对量的比较,缺乏土地利用方式对土壤特性空间变异结构的影响及相应情况下主要变异源的研究。因此,本文以黄淮海平原典型地区为例,研究在不同土地利用方式(传统耕地、免耕地、金银花地和杨树林地)下,土壤入渗特性的空间变异规律及其主要变异源。

## 1 试验区概况

封丘县地处河南省东北部,黄淮海平原中部,南临黄河,北接华北平原腹地,位于东经 114°14' ~ 114°45', 北纬 34°53' ~ 35°14', 属于典型的暖温带半湿润季风气候区。多年平均降水量约为 605 mm, 年平均蒸发量约为 1 875 mm, 远大于降雨量。该地区地貌具有典型的沿黄河及黄河泛滥区特征,地势由西南向东北倾斜,全县海拔 65.0 ~ 72.5 m, 地下水埋深在 3 ~ 15 m 之间。潮土是该地区分布最广、面积最大的耕作土壤,占全县土壤总面积的 98.57%。封丘县的主要种植作物是小麦和玉米,金银花是主要经济植物之一,在农地之间有防风林分布,耕作方式以传统耕作为主,但少耕和免耕面积也在不断扩大。

## 2 材料与方方法

本研究依据封丘县常见的 4 种土地利用方式(杨树林地、金银花地、免耕地和耕地),选择 4 块试验地,试验地均位于中国科学院封丘农业生态实验站附近 2 km 以内。杨树林地主要为防风林,金银花地的种植历史在 10 年以上,免耕和常规耕作农田是冬小麦-夏玉米轮作系统,免耕技术的应用历史接近 5 年。在每块试验地内选择一条自北向南,长 90 m(当地田块的平均尺度)的断面,在断面上以 3 m 为间隔均匀布点。在每个试验点,利用圆盘入渗仪进行相同圆盘直径(22 cm)和相同负压(-2 cm)的入渗试验。试验前以 3 个重复在试验点附近用土钻采集表层 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤以分析土壤初始含水量、有机质含量和颗粒组成,用环刀对 0 ~ 10 cm 土层进行 3 次重复取样以测量土壤容重,用温度计测定水温;试验过程中记录圆盘入渗仪储水水位随时间的变化过程;试验结束后在圆盘正下方取土测定含水量。土壤含水量、有机质含量和土壤颗粒组成分别采用烘干法、重铬酸钾氧化法和吸管法测定。所有入渗试验在 2011 年 4 月中旬到 6 月初之间进行。

直接决定入渗快慢的两个重要参数是吸渗率和饱和导水率。这两个参数可通过圆盘入渗仪单盘瞬态入渗试验获得。从圆盘的三维入渗过程用 Philip 两项入渗公式描述,即

$$I = C_1 t^{0.5} + C_2 t \quad (1)$$

式中  $I$  为累积入渗量, cm;  $t$  为入渗历时, min;  $C_1$  和  $C_2$  为与土壤特性有关的参数,通过式(1)拟合实测的累积入渗量曲线即可获得参数  $C_1$  和  $C_2$  的值。Haverkamp 等<sup>[15]</sup>的研究给出了参数  $C_1$  和  $C_2$  与土壤特性之间的关系。根据这些关系, Vandervaere 等<sup>[16-17]</sup>提出通过  $C_1$  和  $C_2$  计算土壤吸渗率和饱和导水率的方法,即

$$s = C_1 \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{3}{2 - \beta} \left[ C_2 - \frac{\gamma C_1^2}{r(\theta_0 - \theta_i)} \right] \quad (3)$$

式中  $s$  为土壤吸渗率, cm/min<sup>0.5</sup>;  $K_0$  为圆盘负压对应的导水率, cm/min, 由于本文试验所用负压较低(-2 cm), 这里可近似为饱和导水率;  $r$  为圆盘入渗仪底盘半径, cm;  $\gamma$  为与圆盘侧边水分扩散有关的常数,忽略重力效应时,其值为 0.75;  $\beta$  为与一维垂直入渗中重力效应有关的常数,介于 0 ~ 1 之间,通常可取 0.6;  $\theta_0$  和  $\theta_i$  分别为圆盘负压对应的容积含水量和土壤初始含水量, cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

本文拟用均值、标准差、变异系数和概率分布等指标揭示土壤特性空间变异的基本统计特征,用变异函

数(半方差函数)来揭示变量的空间自相关性或者空间依赖关系。土壤特性变量一般服从正态分布或对数正态分布, 概率分布的判定采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S)方法, 样本的累积频率与期望分布的累积概率的最大差值(即 K-S 距离)越小, 样本服从期望分布的可能性越大。变异系数  $C_V$  的计算公式如下:

$$C_V = \sigma/m \times 100\% \quad (4)$$

式中  $\sigma$  为样本的标准差;  $m$  为样本均值;  $C_V$  小于 15% 为小变异, 介于 16% ~ 35% 之间为中等强度变异, 大于 36% 为强变异。样本半方差  $\gamma(h)$  和标准半方差  $\gamma'(h)$  的计算公式分别为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

$$\gamma'(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 / \sigma^2 \quad (6)$$

式中  $h$  为滞后距, cm;  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i + h)$  分别为两个距离为  $h$  的点的实现值;  $N(h)$  为滞后距为  $h$  的观测样本对的个数。样本半方差函数通常可用以下数学模型来描述, 即

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + Cf(h/a) & 0 \leq h < a \\ C_0 + C & h \geq a \end{cases} \quad (7)$$

式中 函数  $f(h/a)$  最常见的形式是球型函数、指数函数、高斯型函数和线性函数<sup>[19]</sup>;  $a$  为变程, 是随机变量的最大自相关距;  $C_0$  为块金方差, 它的值越大, 表示样本误差和采样尺度下的变异源引起的变异越大;  $C$  为结构方差, 反映在采样尺度上的变异源所引起的变异;  $C_0 + C$  为基台值, 反映样本误差和研究区域尺度以下的所有变异源所引起的总变异。常用  $C/(C_0 + C)$  的比值(结构比)作为度量变量空间自相关的尺度, 该比值大于 0.75, 则变量的空间相关程度较强, 空间变异主要受结构性因子影响; 该比值小于 0.25, 则属于空间弱相关, 空间变异主要受随机性因子影响; 该比值为 0.25 ~ 0.75, 则变量具有中等程度的空间自相关, 结构性因子和随机因子对变量空间变异的影响程度相当。变量半方差和标准半方差的计算和拟合采用 Gswin9.0 软件<sup>[19]</sup>。统计和相关分析用 SPSS 18.0。

### 3 结果与讨论

质地也是影响土壤入渗特性最重要的因素之一, 但质地的变异通常发生在较大的空间尺度上。本文所研究的尺度在 100 m 以内, 各试验地的土壤均为砂质壤土(美国农业部质地分类系统), 且颗粒组成在 0.05 置信水平上无显著差异, 因此质地的影响基本可以排除。

#### 3.1 土地利用方式对 30 min 累积入渗量及其变异的影响

入渗是多因素综合作用的结果, 从单一指标很难对入渗的田间变异做出综合评价。本文以充分供水时的 30 min 一维累积入渗量为例来研究土地利用方式对土壤入渗空间变异的影响, 入渗量依据 Philip 两项入渗公式和圆盘瞬态入渗法预测的参数计算获得。

由表 1 可知, 耕作地具有最大的 30 min 入渗量, 然后依次是金银花地和杨树林地。入渗量最小的是免耕地, 大约只有耕作地的 1/3。对于非耕作地(免耕地、金银花地和杨树林地), 入渗量的均值越大, 其标准差越大, 但耕作地入渗量的标准差仅比免耕地大。相对于标准差, 变异系数更能反映变量的变异强度。各土地利用方式下, 入渗量变异强度的大小顺序为: 耕作地 < 免耕地 < 杨树林地 < 金银花地。除了耕作地属于中等变异, 其余 3 种土地利用方式下的入渗量均存在强变异。从统计分布特征来看, 耕作地和免耕地的入渗量服从正态分布, 而金银花地和杨树林地的入渗量则服从对数正态分布。

土地利用方式对入渗特性空间变异的影响还反映在变量空间自相关关系或空间依赖性的改变上。图 1 显示了 4 种不同土地利用方式下, 入渗量的半方差随滞后距的变化情况。就具体的入渗量半方差来看, 相同的滞后距下, 金银花地最大, 耕作地次之, 免耕地最小, 杨树林地大体上介于金银花地和耕作地之间。在研究尺度内, 免耕地入渗量的半方差随滞后距的增加呈微弱的增加趋势; 耕作地和金银花地入渗量的半方差则随

表 1 土壤入渗特性指标的统计分析结果

Table 1 Statistical results of soil infiltration properties

土地利用方式	变量	平均值	标准差	变异系数	变异强度	K-S 距离	分布类型
耕作地	$I_{30}$	1.811	0.447	0.247	中	0.08	正态
	$S$	0.271	0.094	0.345	中	0.10	正态
	$K_s$	0.034	0.027	0.784	强	0.13	对数正态
免耕地	$I_{30}$	0.622	0.249	0.401	强	0.07	正态
	$S$	0.055	0.034	0.619	强	0.12	对数正态
	$K_s$	0.024	0.013	0.526	强	0.07	对数正态
金银花地	$I_{30}$	1.140	0.680	0.596	强	0.13	对数正态
	$S$	0.065	0.052	0.806	强	0.08	对数正态
	$K_s$	0.056	0.032	0.570	强	0.12	正态
杨树林地	$I_{30}$	1.090	0.456	0.418	强	0.15	对数正态
	$S$	0.068	0.033	0.491	强	0.09	正态
	$K_s$	0.051	0.025	0.490	强	0.14	对数正态

注:  $I_{30}$ 、 $S$  和  $K_s$  分别为 30min 入渗量 (cm)、吸渗率 ( $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$ ) 和饱和导水率 ( $\text{cm}/\text{min}$ )。下同。

滞后距的变化呈近线性增加的趋势, 即便在图示的最大滞后距 (45 m) 处也没有达到最大值; 杨树林地的入渗量半方差则呈现典型的空间依赖关系, 先是随滞后距的增加而增加, 随后达到一个相对稳定的水平。为进一步揭示累积入渗量半方差的空间依赖性规律, 4 类半方差函数模型 (球型函数、指数函数、高斯型函数和线性函数) 分别用来拟合半方差与滞后距的关系, 拟合最佳的模型用于描述入渗量半方差的空间相关关系。由表 2 可知, 适合 4 种土地利用方式的最佳半方差模型有所不同, 但基本都具有较好的拟合效果。此外, 通过表 2 中的模型参数可以揭示土地利用方式对土壤入渗量的变异程度、变异结构和变异尺度的影响。4 类土地利用方式, 入渗量半方差块金值和基台值的大小顺序相同, 均为: 金银花地 > 耕作地 > 杨树林地 > 免耕地。免耕地、耕作地和金银花地入渗量半方差的变程均在 130 m 以上, 可能需要更大的采样区域以获得更加准确和完整的半方差趋势,

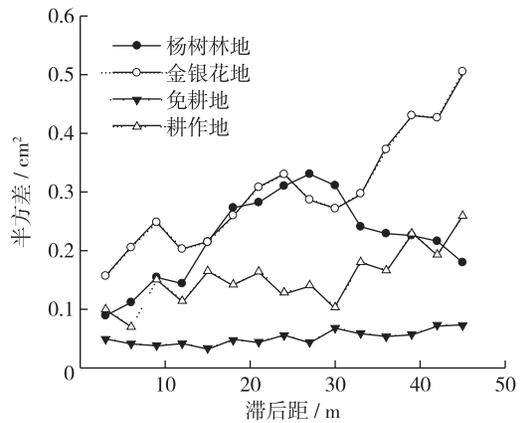


图 1 4 种土地利用方式下 30min 累积入渗量的半方差  
Fig. 1 Semi-variogram of 30min cumulative infiltration for four different land use types

表 2 土壤入渗特性指标半方差函数拟合结果

Table 2 Results of fitting to the semi-variogram of soil infiltration properties

土地利用方式	变量	模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C_1$	变程 $a/m$	结构比 $C/(C_0 + C)$	决定系数 $r^2$
耕作地	$I_{30}$	高斯函数	0.108 00	0.652 0	157	0.83	0.628
	$S$	球型函数	0.003 28	0.009 1	21	0.64	0.582
	$K_s$	球型函数	0.000 00	0.000 6	5	1.00	0.022
免耕地	$I_{30}$	指数函数	0.033 50	0.123 4	303	0.73	0.604
	$S$	线性函数	0.000 78	0.001 1	45	1.00	0.216
	$K_s$	指数函数	0.000 11	0.000 3	277	0.67	0.588
金银花地	$I_{30}$	高斯函数	0.194 00	1.126 0	132	0.83	0.872
	$S$	球型函数	0.001 11	0.003 7	92	0.70	0.798
	$K_s$	高斯函数	0.000 42	0.003 7	164	0.89	0.913
杨树林地	$I_{30}$	球型函数	0.034 10	0.259 2	24	0.87	0.673
	$S$	指数函数	0.000 33	0.001 3	12	0.76	0.232
	$K_s$	球型函数	0.000 01	0.000 9	26	0.99	0.830

但这又超出了当地典型田块的尺度,会引进新的变异源。相对而言,杨树林地入渗量半方差的变程仅为24 m,远低于其他土地利用方式。由表2可知,除了免耕地入渗量半方差的变异结构比略低于0.75外,其他土地利用方式的变异结构比接近,且都大于0.83。说明采样尺度上的结构变异均远大于试验误差和采样尺度以下变异组成的块金变异,免耕地的结构变异相对较弱。除了人为扰动强烈的耕作地外,其他各土地利用方式下,入渗量空间变异结构比的大小顺序为:免耕地 < 金银花地 < 杨树林地。

### 3.2 土地利用方式对吸渗率和饱和导水率及其变异的影响

吸渗率和饱和导水率分别反映土壤水在基质势和重力势作用下的入渗能力,对其空间变异的研究有助于分析造成入渗空间变异的原因。由表1可知,耕作地的平均吸渗率最大,远高于其他土地利用方式,其次是杨树林地和金银花地,免耕地最小,约是同期耕作地的1/5倍。但是耕作地吸渗率的变异系数却是最小的,属中等程度变异,其他土地利用方式的吸渗率均属强变异,其中金银花地的变异系数最大,免耕地和杨树林地次之。此外,吸渗率的概率分布也因土地利用方式而异。免耕地和耕作地的平均饱和导水率明显低于杨树林地和金银花地,其中免耕地最小,金银花地最大。所有的土地利用方式下,饱和导水率都属于强变异,其中耕作地饱和导水率的变异系数明显大于其他土地利用方式。除了金银花地的饱和导水率服从正态分布,其他土地利用方式下均服从对数正态分布。

为了从空间变异结构上揭示累积入渗量、吸渗率和饱和导水率之间的差异和关联,把各土地利用方式下3个指标的标准半方差分布同时显示于图2。杨树林地、金银花地和免耕地的3个人渗特性指标空间变异结构显示出很好的一致性。3种土地利用方式下,累积入渗量和饱和导水率半方差分布具有完全一样的最佳拟合模型、非常接近的变程、空间结构比,甚至决定系数(表2)。虽然耕作地饱和导水率标准半方差随滞后距的增加变化趋势不太明显,但是累积入渗量和吸渗率的变化趋势基本是一致的。由此可以推知,对于人为扰动相对较小的免耕地、金银花地和杨树林地,影响饱和导水率空间变异的因素对于入渗量的空间变异具有更重要的作用,而对于传统耕作地,影响吸渗率的因素则相对更加重要。

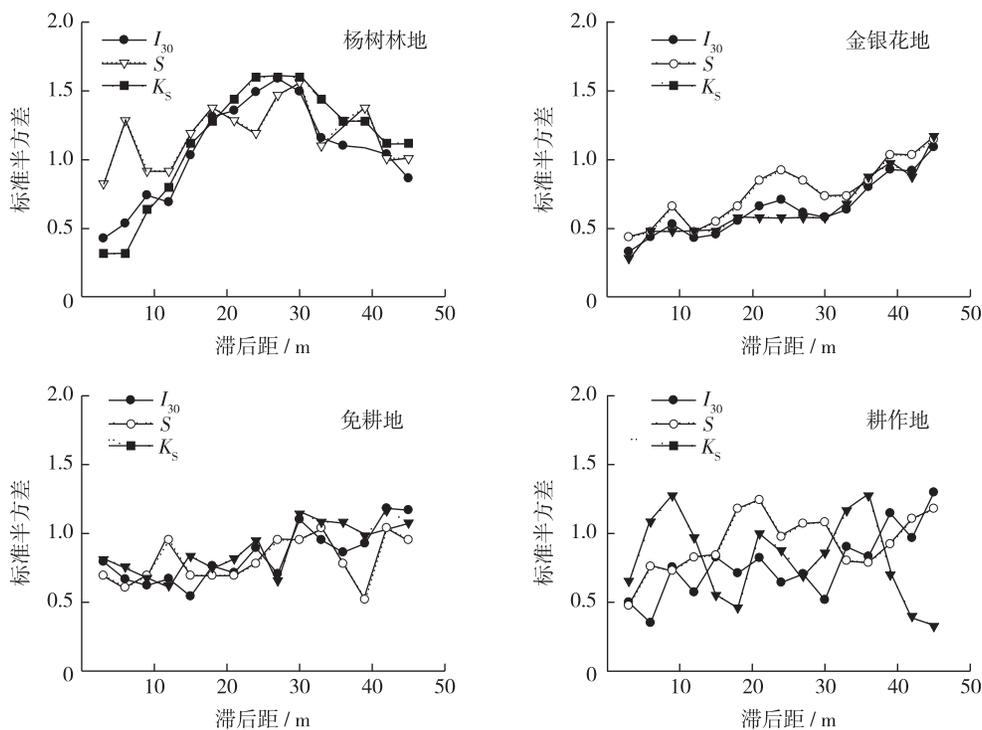


图2 4种土地利用方式下吸渗率的半方差

Fig. 2 Semi-variogram of soil sorptivity for four different land use types

### 3.3 不同土地利用方式下土壤入渗特性空间变异源分析

在土壤质地和供水条件一样的情况下, 土壤入渗主要受土壤结构和土壤初始水分状况决定, 并受水温的影响。土壤结构包括土壤总孔隙度和土壤孔隙尺寸分布。总孔隙度决定土壤总的导水通道的大小, 与反映土壤松紧程度的容重直接相关; 在质地一定情况下孔隙尺寸分布主要受土壤团聚程度的影响, 而有机质含量被发现对土壤团聚状况有强烈影响。因为实际的入渗是上述因素综合作用的结果, 累积入渗量的空间异质性结构必然在其中有所反映。

统计分析结果(表 3)表明, 土地利用方式对土壤容重和有机质含量有显著影响。各样地容重的大小顺序为: 耕地 > 杨树林地 > 免耕地 > 金银花地; 有机质含量的大小顺序为: 免耕地 > 金银花地 > 耕地 > 杨树林地。耕作强度和植物种类的差异可能是其主要原因。相对于传统耕作, 免耕可以尽可能少地破坏土壤结构, 有利于土壤团聚体的形成, 甚至有机质的积累。相对于一年生的小麦和玉米轮作系统, 多年生深根植物在杨树林地表层的根系活动较少, 土壤抗压实能力较弱。但是, 耕作土壤由于土壤结构遭到破坏, 并且翻耕也可能加速了有机质的分解速率, 机械作业也使土壤更容易被压实, 虽然扰动频繁, 仍然具有最大容重。此外, 耕作土壤的物理特性很可能是随耕作和作物生长呈周期变化的, 本研究在耕地进行田间试验(4月中旬到5月初), 正处于小麦关键生长期, 这一时期的土壤容重相对较大, 在其他时间, 其相对大小则可能有些不同。由于田间试验工作量大, 时间跨度长, 再加上天气原因, 各试验地初始含水量和水温也存在一定程度的差异。试验地初始含水量的大小顺序为: 免耕地 > 金银花地 > 耕地 > 杨树林地, 其中耕地的初始含水量几乎只有免耕地的一半。耕地上的试验开展最早, 试验时的平均水温明显低于其他样地的水温。

表 3 土壤基本物理特性和水温的统计分析结果

Table 3 Statistical results of basic soil physical properties and water temperature

土地利用方式	变量	平均值	标准差	变异系数	变异强度	K-S 距离	分布类型
耕地	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.502	0.065	0.043	小	0.11	正态
	有机质/%	13.525	1.459	0.108	小	0.11	对数正态
	初始含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.131	0.018	0.137	小	0.14	对数正态
	水温/°C	19.670	3.488	0.177	中	0.12	正态
免耕地	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.428	0.105	0.074	小	0.18	正态
	有机质/%	15.825	2.324	0.147	小	0.15	对数正态
	初始含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.240	0.084	0.350	中	0.2	对数正态
	水温/°C	26.012	2.764	0.106	小	0.10	正态
金银花地	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.400	0.085	0.061	小	0.16	正态
	有机质/%	15.314	4.145	0.271	中	0.11	对数正态
	初始含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.165	0.049	0.299	中	0.09	对数正态
	水温/°C	24.832	2.610	0.105	小	0.13	对数正态
杨树林地	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.487	0.097	0.065	小	0.15	正态
	有机质/%	11.347	1.413	0.125	小	0.10	对数正态
	初始含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.106	0.018	0.169	中	0.10	正态
	水温/°C	26.173	2.338	0.089	小	0.15	正态

注: SPSS 单因素方差分析表明, 各土地利用方式的容重和有机质在 0.01 置信水平上存在显著差异。

虽然在理论上, 容重的减小意味着孔隙度的降低, 有机质的增加有利于土壤团聚体的形成, 水温的增加会降低水的粘滞性, 初始含水量的降低会提高土壤的吸渗能力, 进而促进入渗, 但实际的入渗并不受这些因素的单一影响。比较表 1 和表 3 可知, 入渗变量( $I_{30}$ 、 $S$  和  $K_s$ )与单个土壤特性指标之间并没有很明显的关系。以耕地为例, 其试验时的平均容重最大, 水温最低, 有机质含量也不高, 但初始含水量很低。其结果是耕地的吸渗率远大于其他样地, 虽然饱和导水率低于杨树林地和金银花地, 但 30 min 入渗量依然最大。

从变异程度来看, 土壤基本物理特性的变异强度均小于土壤入渗特性, 属于中小强度的变异指标。其中, 对于耕地, 水温的变异强度甚至大于其基本物理特性的变异; 对于免耕地和杨树林地, 只有初始含水量具有中等强度的变异; 在金银花地, 则有机质含量和初始含水量的变异强度相对较大。

在多因素综合作用下, 直接分析土壤入渗特性与其他物理特性之间的定量关系是困难的, 各变异源自身

变异的强弱也不能表明其对土壤入渗特性变异贡献的大小,除非已知土壤入渗特性的变异与土壤内部可能的变异源之间的联系。依据土壤特性半方差函数的相似性,结合变量之间的物理联系,通过多元线性回归方法分析影响土壤入渗的主要变异源则是可能的途径之一。为此,首先计算了土壤各入渗特性,以及土壤基本物理特性和水温在不同滞后距的标准半方差,然后通过向后逐步回归法剔除对土壤入渗特性空间变异影响不显著的因子,建立各土壤入渗特性标准半方差与其显著影响因子之间的多元线性关系。留下的因子被认为对入渗特性空间变异有显著影响。各因子的回归系数,以及最终的确定系数见表4。由表4可知,在不同的土地利用方式下,影响土壤入渗特性的主要变异源是不同的。对于常规耕作地,影响入渗量变异的主要因子是初始含水量、有机质含量和容重;初始含水量则是唯一显著影响吸渗率的因子;但并无显著影响饱和和导水率变异的因子,可能试验误差等其他变异源居于主导地位,或各变异源的贡献相当。对于免耕地,容重是导致吸渗率变异的唯一显著性因子;水温甚至超过其他所有变异源,成为影响饱和和导水率变异的唯一显著性因子;入渗量变异同样没有显著性影响因子。对于金银花地的3个入渗特性,初始含水量都是唯一影响显著的变异源。对于杨树林地,初始含水量和有机质含量都显著地影响3个入渗特性,是主要的变异源。此外,相对于其他土地利用方式,免耕地的确定系数要低得多,可见表4中所列的因子不足以解释免耕地入渗特性的空间变异,可能存在其他更重要的变异源,如试验误差或影响土壤结构的其他因子等。在大多数情况下,水温的变异对于入渗变异的贡献很小,可以忽略,但在有些情况下,其影响也可能是显著的。

表 4 土壤入渗特性指标与变异因子标准半方差的向后逐步回归分析结果

Table 4 Results of the backward stepwise regression analysis of the standard semi-variance of soil infiltration properties with that of variation factors

土地利用方式	入渗特性	容重	有机质	初始含水量	水温	常数项	决定系数 $r^2$
耕作地	$I_{30}$	0.542	0.560	0.634	-	-0.727	0.792
	S	-	-	0.969	-	0.151	0.433
	$K_s$	-	-	-	-	-	-
免耕地	$I_{30}$	-	-	-	-	-	-
	S	0.420	-	-	-	0.362	0.291
	$K_s$	-	-	-	1.179	-0.300	0.246
金银花地	$I_{30}$	-	-	0.779	-	0.151	0.844
	S	-	-	0.744	-	0.287	0.714
	$K_s$	-	-	0.867	-	0.095	0.880
杨树林地	$I_{30}$	-	0.802	0.909	-	-0.587	0.587
	S	-0.697	0.809	0.972	-0.836	0.835	0.675
	$K_s$	-	1.230	1.051	-	-1.047	0.686

## 4 结 论

本文系统研究了4种土地利用方式(耕作地、免耕地、金银花地和杨树林地)对土壤入渗特性及其空间变异规律的影响,并分析了引起土壤入渗特性空间变异的主要变异源。研究表明,土地利用方式不仅影响土壤入渗特性的大小,而且影响其变异的空问依赖性规律。① 4种土地利用方式下,平均30 min入渗量的大小顺序依次为:耕作>金银花地>杨树林地>免耕地,免耕地的入渗量约只有耕作地的1/3。耕作地的平均吸渗率最大,远高于其他土地利用方式,免耕地最小,大约只有同期耕作地的1/5。免耕地和耕作地的平均饱和和导水率明显低于杨树林地和金银花地,其中免耕地最小,金银花地最大。② 对同一种土地利用方式,吸渗率、饱和和导水率和30 min入渗量的标准半方差具有相似的空问依赖结构。③ 在研究尺度内,入渗特性的标准半方差在传统耕作地随滞后距的增加呈微弱的增加趋势;在免耕地和金银花地则随滞后距的变化呈近线性增加的趋势;在杨树林地则具有典型的变异函数特征,先随滞后距的增加而增加,此后达到一个相对稳定的水平。④ 频繁的耕作会使土壤特性的空问变异强度减弱,空问变异结构遭到破坏,扰动最小的杨

树林地的土壤入渗特性空间变异结构则比较明显。

对入渗特性空间变异源的分析结果表明:①除了免耕地,初始含水量是其他土地利用方式下最主要的变异源之一;②有机质的变异对免耕地和金银花地的入渗变异影响不大,但对杨树林地入渗变异的影响特别显著;③相对于其他土地利用方式,所分析因子的变异不足以解释免耕地的入渗变异,可能存在其他更重要的变异源;④水温等环境变量也可以成为土壤入渗特性空间变异研究中的重要干扰因素。

#### 参考文献:

- [1] BORMANN H, KLAASSEN K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils [J]. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 295-302.
- [2] CORWIN D L, HOPMANS J, de ROOIJ G H. From field-to landscape-scale vadose zone processes: Scale issues, modeling, and monitoring [J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(1): 129-139.
- [3] van DER KEUR P, IVERSEN B V. Uncertainty in soil physical data at river basin scale: A review [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(6): 889-902.
- [4] LEWIS C, ALBERTSON J, XU X, et al. Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hill-slope [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 1527-1537.
- [5] SHARMA P, SHUKLA M K, MEXAL J G. Spatial variability of soil properties in agricultural fields of Southern New Mexico [J]. *Soil Science*, 2011, 176: 288-302.
- [6] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 等. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(4): 471-476. (JIA Hongwei, KANG Shaozhong, ZHANG Fucang, et al. Spatial variability of soil water infiltration in the plain of Shiyang River basin [J]. *Advance in Water Science*, 2006, 17(4): 471-476. (in Chinese))
- [7] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 214-221. (LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedo-transfer functions [J]. *Advance in Water Science*, 2010, 21(2): 214-221. (in Chinese))
- [8] ZELEKE T B, SIB C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. *Geoderma*, 2006, 134(3/4): 440-452.
- [9] BORMANN H, KLAASSEN K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils [J]. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 295-302.
- [10] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review [J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [11] ROGER-ESTRADE J, RICHARD G, DEXTER A R, et al. Integration of soil structure variations with time and space into models for crop management: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(1): 135-142.
- [12] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响 [J]. *自然资源学报*, 2012(3): 422-429. (ZHAO Jinmei, ZHANG Degang, LIU Changzhong. The effect of land use patterns on soil moisture retention capacity and soil infiltration property in eastern Qilian Mountain [J]. *Journal of natural resources*, 2012(3): 422-429. (in Chinese))
- [13] 林培松, 高全洲. 不同土地利用方式下紫色土结构特性变化研究 [J]. *水土保持研究*, 2010(4): 134-138. (LIN Peisong, GAO Quanzhou. Study on changes in structural properties of purple soils under different land use [J]. *Research of soil and water conservation*, 2010(4): 134-138. (in Chinese))
- [14] HEMMAT A, AHMADI I, MASOUMI A. Water infiltration and clod size distribution as influenced by ploughshare type, soil water content and ploughing depth [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(2): 257-266.
- [15] HAVERKAMP R, ROSS P J, SMETTEM K R J, et al. 3-Dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2: Physically-based infiltration equation [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(11): 2931-2935.
- [16] VANDERVAERE J P, VAUCLIN M, ELRICK D E. Transient flow from tension infiltrometers: II: Four methods to determine sorptivity and conductivity [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1272-1284.
- [17] VANDERVAERE J P, VAUCLIN M, ELRICK D E. Transient flow from tension infiltrometers: I: The two-parameter equation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1263-1272.
- [18] NIELSEN D, WENDROTH O. Spatial and temporal statistics-sampling field soils and their vegetation [M]. Reiskirchen: Catena

Verlag, 2003.

- [19] ROBERTSON G P. GS + Version 9.0; GeoStatistics for the environmental sciences [ M ]. Plainwell: Gamma Design Software, 2008.

## Regularity of spatial variability of soil infiltration and its variation sources\*

HE Dan<sup>1,2</sup>, MA Donghao<sup>2</sup>, ZHANG Xizhou<sup>1</sup>, ZHANG Jiabao<sup>2</sup>, ZHENG Zicheng<sup>1</sup>

(1. College of Environmental and Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The influence of land use types on soil infiltration is one of the hot research topics in soil hydrology. In this research, four typical land use types in the Fengqiu region were chosen to systematically study the intensity, structure and main sources of the spatial variability of soil infiltration under different land use conditions. The result shows that the frequent cultivation can reduce soil heterogeneities, and thus weaken the spatial variability of soil structures. Compared to traditional tillage practices, soil properties exhibit high degree of apparent spatial structure in no-till and honeysuckle fields. The infiltration characteristic in forest soils, which received the least disturbance, varies most and exhibits a smallest range of variability among the four land use types. The soil bulk density, soil organic matter content and initial soil moisture are the major sources of variation for the spatial variability of soil infiltration. The initial soil moisture is the sole source of variation in the honeysuckle field. On the forest soil, the soil organic matter content and initial soil moisture are the major sources of variation. No significant variation sources are found on the no-till field. In some cases, the temperature of water could be an important factor to distort the spatial variability of soil infiltration.

**Key words:** land use type; infiltration; spatial variability; variation source

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50909090) and the National Basic Research Program of China (No. 2011CB100506).