

土壤侵蚀与土地利用方式对黑土地 土壤水气传输特性的影响

赵旭¹ 樊军^{1,2*} 付威¹

(¹西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 土壤侵蚀是东北黑土退化的主要原因之一,了解不同土地利用方式下土壤水气传输性质的差异,可以为黑土区水土资源的高效利用和保护提供科学依据。本研究选取东北黑土区典型的3种土地利用方式(农地、林地、撂荒地)进行0~5 cm土层原位土壤饱和导水率、导气率和相对气体扩散率的测定,探讨土壤侵蚀和土地利用方式对土壤水气传输性质的影响。结果表明:不同侵蚀程度农地之间以及不同土地利用方式之间土壤水气传输性质差异显著。重度侵蚀农地容重显著高于其他样地,未侵蚀农地容重显著低于其他样地。与未侵蚀农地相比,轻度、中度和重度侵蚀农地容重分别增加12.7%、17.6%和39.2%,饱和导水率分别降低84.4%、53.7%和12.7%,导气率分别降低94.6%、64.4%和14.0%,相对气体扩散率分别降低91.3%、82.6%和4.3%。松林地饱和导水率、导气率和相对气体扩散率较未侵蚀农地分别降低86.5%、83.0%和91.3%。沙棘林地饱和导水率、导气率和相对气体扩散率较未侵蚀农地分别降低51.7%、45.6%和82.6%。撂荒地饱和导水率、导气率和相对气体扩散率较未侵蚀农地分别降低16.2%、1.4%和73.9%。可以利用测得的土壤导气率、相对气体扩散率估算土壤饱和导水率。土壤侵蚀和土地利用方式显著影响黑土地土壤水气传输特性。

关键词 土地利用方式; 土壤侵蚀; 饱和导水率; 导气率; 相对气体扩散率

Effects of soil erosion and land use patterns on the characteristics of soil water and gas transport in the black soil region. ZHAO Xu¹, FAN Jun^{1,2*}, FU Wei¹ (¹College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Soil erosion is one of the main causes for the degradation of black soil in Northeast China. Understanding the differences of soil water and air transport under different land use patterns can provide scientific basis for efficient utilization and protection of soil and water resources in the black soil area. In this study, we examined the *in-situ* soil saturated hydraulic conductivity, air permeability and relative gas diffusion of 0–5 cm soil layer in three typical land use patterns (cropland, woodland, abandoned land) in the Northeast black soil area and explored the impacts of soil erosion and land use pattern on water and gas transport. Results showed that there were significant differences in soil water and air transport between different eroded croplands and between different land use patterns. Soil bulk density of serious erosion cropland was higher than that of other lands, and that of ungraded cropland was significantly lower than other lands. Compared with the ungraded cropland, soil bulk density in the light erosion cropland, the moderate erosion cropland and the serious erosion cropland increased by 12.7%, 17.6% and 39.2%, saturated hydraulic conductivity decreased by 84.4%, 53.7% and 12.7%, air permeability decreased by 94.6%, 64.4% and 14.0%, and relative gas diffusion decreased by 91.3%, 82.6% and 4.3%, respectively. The satu-

本文由国家重点研发计划项目(2018YFC0507005)资助 This work was supported by the National Key R&D Project of China (2018YFC0507005).
2020-01-17 Received, 2020-03-11 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

rated hydraulic conductivity, air permeability and relative gas diffusion of pine forest decreased by 86.5%, 83.0% and 91.3% respectively compared with that of ungraded cropland, saturated hydraulic conductivity, air permeability and relative gas diffusion of sea-buckthorn forest decreased by 51.7%, 45.6% and 82.6%, and saturated hydraulic conductivity, air permeability and relative gas diffusion of abandoned land decreased by 16.2%, 1.4% and 73.9% respectively compared with that of ungraded cropland. In addition, the measured result of soil air permeability and relative gas diffusion could be used to estimate saturated soil hydraulic conductivity. Soil water and gas transport characteristics were significantly affected by soil erosion and land use pattern.

Key words: land use pattern; soil erosion; saturated hydraulic conductivity; air permeability; relative gas diffusion.

土壤侵蚀是造成土壤退化的最重要原因之一^[1]。在我国东北黑土区同样存在土壤侵蚀问题,并且处于持续恶化的趋势。土壤水气传输特性作为土壤重要的物理参数,对土壤侵蚀具有重要影响。水力特性是控制土壤中溶质运移的关键因素^[2],土壤饱和导水率(K_s)是土壤水力特性的重要指标,是决定土壤入渗和渗漏性能的主要因素^[3]。土壤导气率(K_a)和相对气体扩散率(D_p/D_0)决定了土壤气体的传输能力。土壤水气传输直接影响植物的生产能力、生态系统的水热循环,进而影响到生态系统的生产力及其服务功能^[4]。因此,揭示土壤水气传输特性对于研究黑土区土壤入渗、地表径流、土壤侵蚀、养分循环等具有十分重要的意义。大量研究表明,土壤侵蚀和土地利用方式会影响土壤的容重、孔隙度、结构等性质,进而影响土壤中水分和气体的运动。查小春等^[5]研究表明,土壤侵蚀会导致土壤黏粒含量和 >0.25 mm 水稳性团粒含量减少、粗粉粒含量和容重增加、土壤结构和孔隙状况变差。高朝侠等^[6]研究表明,植被恢复通过植物根系穿插、土壤动物活动等形成大孔隙,可显著提高黄土塬区土壤入渗性能。Bodhinayake 等^[7]通过比较张力渗透仪和双环渗透仪测定的草地和耕地的田间饱和导水率,认为耕作减少了土壤大孔隙度,而牧草种植则倾向于增加大孔隙度,因此其饱和导水率显著高于耕地。Zimmermann 等^[8]通过量化原始林、牧草、次生林下 2 个深度(12.5 和 20 cm)的渗透性和田间饱和导水率得出,土地利用的种类、强度和持续时间显著影响土壤水力学性质。Dörner 等^[9]研究了智利南部土地利用方式由次生林转变为草地对土壤物理性质的影响,发现与次生林相比,草地土层深度、土壤储水量、空气储量和导气率较小。

土壤 K_s 的变异性很大,有很强的不确定性,通常可以通过易于测量的土壤性质比如土壤 K_a 和

D_p/D_0 来估计。土壤 K_a 和 D_p/D_0 是表征土壤孔隙弯曲度和连通性的气体运移参数,具有预测土壤水力性质的潜力。东北黑土区大部分土地都被开垦为农田,关于不同土地利用方式对土壤的影响研究主要集中在土壤水分、养分和生物量等方面,对于不同土地利用方式下土壤水气传输特性的研究很少。本研究选取东北黑土区 3 种典型的土地利用方式(农地、林地、撂荒地),进行 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 原位测量,探究土地利用方式对 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 的影响,并建立 K_s 与 K_a 和 D_p/D_0 的相关关系,旨在为东北黑土区水土资源的高效利用提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验包括 7 块样地。其中 5 块样地位于黑龙江省农垦总局九三管理局鹤山农场鹤北小流域(48°59′—49°03′ N, 125°16′—125°21′ E),流域面积约为 28 km²,海拔 310~390 m,地处小兴安岭向嫩江谷地的过渡区,属丘陵漫岗地带,坡度大多在 1°~3°,坡长一般为 800~1500 m,在该区域具有典型代表性。该区属寒温带大陆性季风气候,年降水量 534 mm,6—8 月降水占年降水量的 66.8%。自然植被属于温带半湿润草甸草原,土壤以典型黑土为主。农场开垦于 20 世纪 50 年代,目前大部分土地已被开垦为农田,仅有少量林地和草地。

另外 2 块样地位于吉林省东辽县安石镇杏木小流域(42°58′—43°01′ N, 125°22′—125°26′ E),流域面积约 5.89 km²,最高海拔 452 m,地处长白山余脉,属低山丘陵地带,坡度较大,土壤水力侵蚀严重,坡耕地大多改造为梯田耕作。该区属温带季风气候,年降水量 658 mm,6—9 月降水占年降水量的 67.9%。植被主要包括天然次生林、人工林、草本植物和农作物。土壤以暗棕壤和草甸土为主。两个研究区同属典型的东北黑土区,主要种植作物为玉米

(*Zea mays*) 和大豆(*Glycine max*) , 皆为起垄耕作 , 其作物种类和种植模式在该区域具有典型代表性。

1.2 试验设计

试验选取 3 种土地利用方式下的 7 块样地(表 1)。农地包括鹤北小流域的玉米地和大豆地,林地包括鹤北小流域松林地和杏木小流域沙棘(*Hippophae rhamnoides*) 林地,撂荒地处于杏木小流域。依照坡面不同位置土壤侵蚀所形成的侵蚀沟深度不同,将玉米地分为 3 块样地,分别为轻度、中度和重度侵蚀农地,其侵蚀沟深度依次为 0~10、20~30 和 40~50 cm。大豆地土壤肥沃,没有明显的土壤侵蚀,为未侵蚀农地,作为对照。试验所选样地代表了当地典型的土地利用类型和管理方式。玉米地和大豆地均为玉米和大豆两种作物轮作,播种期在每年 5 月下旬,收获期在 9 月底,每年秋收时将秸秆粉碎还田。松林地为人工林,树龄为 30 年左右,林下稀有杂草,土壤表层被松针所覆盖。沙棘林地生长年限为 4 年,种植密度较低。撂荒地植被依据自然演替规律生长,无人工干扰,优势种为禾本科一年生草本植物狗尾草(*Setaria viridis*)。

本试验相关的原位土壤指标于 2019 年 8—9 月在上述样地采集测定,每块样地选择 1 个具有代表性的小区(2 m×2 m),在小区内采用梅花形布点法设置 5 个测点。对每个测点进行 K_s 的测定,并在不同含水量条件下进行 K_a 和 D_p/D_0 的测定,且均为原位表层土壤(0~5 cm)的测定。含水量梯度设置为连续晴天后、下雨后一天和土壤田间持水量。为使土壤含水量为田间持水量,傍晚时对样地测点进行充分灌水,并用地膜覆盖抑制土壤蒸发,待土壤水分经过再分布过程,第二天上午进行 K_a 和 D_p/D_0 的测定。每次 K_a 和 D_p/D_0 测定时用铝盒取样,带回用烘干法测定土壤含水量。用环刀取样测定样地容重

(ρ_b) 和总孔隙度(Φ),并且采样进行土壤水分特征曲线及养分含量的测定。

1.3 相关指标的测定方法和计算

1.3.1 总孔隙度 依据土壤容重进行计算^[10]。

1.3.2 水分特征曲线 利用压力膜仪和 WP4 露点水势仪测定 10 组土壤含水量与土壤水吸力对应值,采用 Gardner 模型对土壤水分特征曲线实测资料进行拟合。Gardner 模型如下:

$$\theta = A \cdot h^{-B} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土壤水吸力(MPa); A 决定土壤持水能力的大小, A 值越大,持水能力越强; B 决定土壤体积含水量随土壤水吸力变化的快慢程度, B 值越小,变化越慢。

1.3.3 土壤饱和导水率 利用 Modified Philip-Dunne (MPD) 入渗仪测量原位土壤饱和导水率^[11]。

1.3.4 土壤导气率 将连接马氏瓶和压力计的气室插入土壤,用马氏瓶排出水的流量代替通过土样气体流量(q),利用 U 型压力计读取土样上表面与大气压差值(Δp),导气率计算公式为^[12]:

$$K_a = \frac{1}{\Lambda} \frac{\eta q}{\Delta p} \quad (2)$$

$$\Lambda = D \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{D}{H} \right) \left(1 + \frac{D}{H} \right)^{-1} \ln \left(1 + \frac{D}{H} \right) \right] \quad (3)$$

$$\eta = (1717 + 4.8T) \times 10^{-8} \quad (4)$$

式中: Λ 为经验形状因子; η 为空气黏滞系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$); q 为单位时间通过土样的气体流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); Δp 为土样上表面与大气压的差(Pa); D 为土样直径(m); H 为土样高度(m); T 为气温($^{\circ}\text{C}$)。该方法原理为通过马氏瓶和 U 型压力计获取经过土样的气体流速和压强差,计算单位压力梯度之下单位面积土壤透气速率,其适用于田间土壤气体渗透性的快速测定。

表 1 试验样地概况

Table 1 General status of experimental lands

地理位置 Geographical position	土地利用类型 Land use pattern	种植年限 Planting age (a)	有机质 Organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phosphorus ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
鹤北小流域 Hebei small watershed	未侵蚀农地 Uneroded cropland	60	55.60±0.60a	2.70±0.14a	1.02±0.02a
	轻度侵蚀农地 Light erosion cropland	60	49.57±0.64c	2.45±0.11ab	0.90±0.02b
	中度侵蚀农地 Moderate erosion cropland	60	23.30±0.69e	1.13±0.04d	0.52±0.02d
	重度侵蚀农地 Serious erosion cropland	60	20.82±0.62f	1.10±0.10d	0.46±0.02e
	松林地 Pine forest	30	52.43±0.99b	2.33±0.09b	0.73±0.03c
杏木小流域 Xingmu small watershed	沙棘林地 Sea-buckthorn forest	4	24.50±0.28e	1.41±0.12c	0.53±0.02d
	撂荒地 Abandoned land	10	27.12±0.88d	1.56±0.06dc	0.40±0.01f

同列不同字母表示差异达到显著水平($P < 0.05$) Different letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

1.3.5 土壤相对气体扩散率 将装有 O₂探头的扩散气室插入土壤,各气室由带有阀门的气管连接,往气室通入 N₂直至数据采集器上记录的 O₂浓度降低到 0 时,停止通入 N₂,并迅速将连接在一起的气室两端通气口关闭,使空气经土样向上扩散,测定相对气体扩散率。

定义 D_p/D_0 为土壤相对气体扩散率,其中 D_p 为土壤中气体扩散系数, D_0 为大气中的气体扩散系数。 D_p 为气体相对浓度 C_r 关于时间 t 的线性函数的斜率。 C_r 计算公式如下^[13]:

$$C_r = \frac{C_t - C_a}{C_0 - C_a} \quad (5)$$

式中: C_t 为气室内 t 时刻 O₂ 浓度(%); C_0 为气室 O₂ 初始浓度(%); C_a 为大气 O₂ 浓度(%); D_0 为关于气压(P)与温度(T)的函数^[13]:

$$D_0 = D_s \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.75} \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (6)$$

式中: D_s 为 D_0 在 $T_0 = 293.15$ K、 $P_0 = 1.013 \times 10^5$ Pa 时的参考值,其值为 $1.47 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[14]。一般在 20 °C D_0 取值为 $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[15]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 统计分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 法多重比较($\alpha = 0.05$)。利用 Origin 9.0 软件作图,图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤容重、总孔隙度和水分特征曲线

在 0~5 cm 土层中,重度侵蚀农地 ρ_b 显著高于其他样地,未侵蚀农地 ρ_b 显著低于其他样地,轻度侵蚀农地、中度侵蚀农地、松林地、沙棘林地、撂荒地之间 ρ_b 无显著性差异。与未侵蚀农地相比,轻度、

中度和重度侵蚀农地 ρ_b 分别增加了 12.7%、17.6% 和 39.2%, θ 分别降低了 8.1%、11.3% 和 25.8%(表 2)。采用 Gardner 模型对土壤水分特征曲线拟合效果较好(表 3)。不同土地利用方式的土壤持水能力大小为未侵蚀农地>松林地>轻度侵蚀农地>中度侵蚀农地>撂荒地>沙棘林地>重度侵蚀农地。对于农地而言,土壤持水能力随土壤侵蚀程度的增加而降低,土壤持水能力与容重和砂粒含量呈显著线性负相关关系。土壤体积含水量随土壤水吸力变化的快慢程度为未侵蚀农地>中度侵蚀农地>轻度侵蚀农地>松林地>撂荒地>沙棘林地>重度侵蚀农地。

2.2 不同土地利用方式下土壤饱和导水率、导气率和相对气体扩散率

土地利用方式显著影响 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 (图 1),其中 K_a 和 D_p/D_0 是土壤含水量为田间持水量时的测定值。与未侵蚀农地相比,轻度、中度和重度侵蚀农地 K_s 分别降低 84.4%、53.7% 和 12.7%, K_a 分别降低 94.6%、64.4% 和 14.0%, D_p/D_0 分别降低 91.3%、82.6% 和 4.3%。松林地 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 较未侵蚀农地分别降低 86.5%、83.0% 和 91.3%。沙棘林地 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 较未侵蚀农地分别降低 51.7%、45.6% 和 82.6%。撂荒地 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 较未侵蚀农地分别降低 16.2%、1.4% 和 73.9%。未侵蚀农地、重度侵蚀农地和撂荒地之间的 K_s 和 K_a 均无显著性差异,未侵蚀农地与重度侵蚀农地 D_p/D_0 无显著性差异。未侵蚀农地和林地中的沙棘林地以及撂荒地 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 较大,水气传输性能较好。

2.3 不同土地利用方式下导气率和相对气体扩散率随土壤含水量的变化

不同土地利用方式下 K_a 和 D_p/D_0 随土壤含水量的增加而降低,土壤体积含水量变化范围为 0.13~0.39 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; K_a 变化范围为 1.06~112.20 μm^2 ; D_p/D_0 变化范围为 0.0001~0.0107。从图 2 可以看

表 2 不同土地利用方式下土壤容重、总孔隙度和机械组成

Table 2 Soil bulk density, total porosity and particle size distribution under different land use patterns

土地利用类型 Land use pattern	容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏粒 Clay ($<0.002 \text{ mm}$, %)	粉粒 Silt ($0.002 \sim$ 0.05 mm , %)	砂粒 Sand ($0.05 \sim$ 2 mm , %)	质地类型 Texture type (美国制 American system)
未侵蚀农地 Uneroded cropland	1.02±0.02c	0.62±0.01a	42.1±0.4b	53.4±0.3b	4.5±0.4d	粉黏土 Silty clay
轻度侵蚀农地 Light erosion cropland	1.15±0.03b	0.57±0.01b	41.5±1.1b	54.0±1.2b	4.5±0.4d	
中度侵蚀农地 Moderate erosion cropland	1.20±0.03b	0.55±0.01b	45.3±4.9b	46.5±1.2c	8.2±6.0bcd	
重度侵蚀农地 Serious erosion cropland	1.42±0.03a	0.46±0.01c	41.2±1.4b	49.4±2.3c	9.5±3.6bc	
松林地 Pine forest	1.18±0.06b	0.56±0.02b	51.0±2.2a	43.3±2.5d	5.6±0.4cd	
沙棘林地 Sea-buckthorn forest	1.18±0.04b	0.55±0.02b	26.4±1.1d	53.4±1.6b	20.2±2.7a	粉砂壤土 Silty sand loam
撂荒地 Abandoned land	1.21±0.02b	0.54±0.01b	30.2±1.2c	59.6±0.5a	10.2±1.7b	粉黏壤土 Silty clay loam

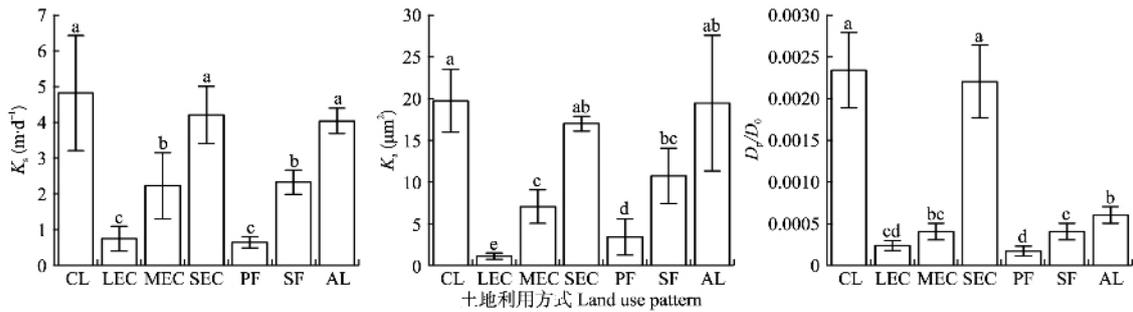


图 1 土地利用方式对土壤饱和导水率(K_s)、土壤导气率(K_a)和土壤相对气体扩散率(D_p/D_0)的影响

Fig.1 Effects of land use pattern on saturated hydraulic conductivity (K_s), air permeability (K_a) and relative gas diffusion (D_p/D_0).

不同字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Different letters indicated significant difference at 0.05 level. CL: 未侵蚀农地 Uneroded cropland; LEC: 轻度侵蚀农地 Light erosion cropland; MEC: 中度侵蚀农地 Moderate erosion cropland; SEC: 重度侵蚀农地 Serious erosion cropland; PF: 松林地 Pine forest; SF: 沙棘林地 Sea-buckthorn forest; AL: 撂荒地 Abandoned land. 下同 The same below.

出 重度侵蚀农地土壤含水量较小, K_a 和 D_p/D_0 对土壤水分最敏感, 其随土壤含水量变化幅度较大。轻度侵蚀农地土壤含水量较大, K_a 和 D_p/D_0 对土壤水分敏感度最低, 其随土壤含水量变化幅度小于其他样地。除轻度和重度侵蚀农地外, 其余样地 K_a 和 D_p/D_0 随土壤含水量变化幅度接近。未侵蚀农地土壤含水量最大, 相同含水量条件下, 其 K_a 和 D_p/D_0 大于其他样地。

2.4 导气率、相对气体扩散率与饱和导水率的相关关系

由图 3 可以看出, 在田间持水量下测得的 K_a 、 D_p/D_0 与 K_s 的对数存在相关关系。导气率(K_a)、相对气体扩散率(D_p/D_0)与饱和导水率(K_s)的关系式如下:

$$K_s = 0.5K_a^{0.71} \quad (7)$$

$$K_s = 367.54(D_p/D_0)^{0.69} \quad (8)$$

表 3 不同土地利用方式下水分特征曲线拟合参数
Table 3 Fitting parameters of soil water characteristic curve under different land use patterns

土地利用类型 Land use pattern	Gardner 模型 Gardner model		R^2
	参数 A Parameter A	参数 B Parameter B	
未侵蚀农地 Uneroded cropland	0.206	0.359	0.98 **
轻度侵蚀农地 Light erosion cropland	0.173	0.325	0.99 **
中度侵蚀农地 Moderate erosion cropland	0.124	0.335	0.99 **
重度侵蚀农地 Serious erosion cropland	0.071	0.227	0.98 **
松林地 Pine forest	0.174	0.318	0.99 **
沙棘林地 Sea-buckthorn forest	0.098	0.264	0.99 **
撂荒地 Abandoned land	0.118	0.293	0.99 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

3 讨 论

3.1 土壤侵蚀和土地利用方式对土壤水气传输性质的影响

土壤侵蚀和土地利用方式对土壤水气传输性质存在显著影响, 土壤侵蚀导致土壤通气透水性变强, 而不同土地利用方式对土壤孔隙状况和结构影响较大。轻度、中度和重度侵蚀农地位于一块坡耕地上, 从坡上到坡下发生了 3 种土壤侵蚀情况。坡上位置的坡度较小, 为中度侵蚀; 坡中位置的坡度变大, 土壤侵蚀严重, 有些位置形成了 40 cm 深度左右的侵

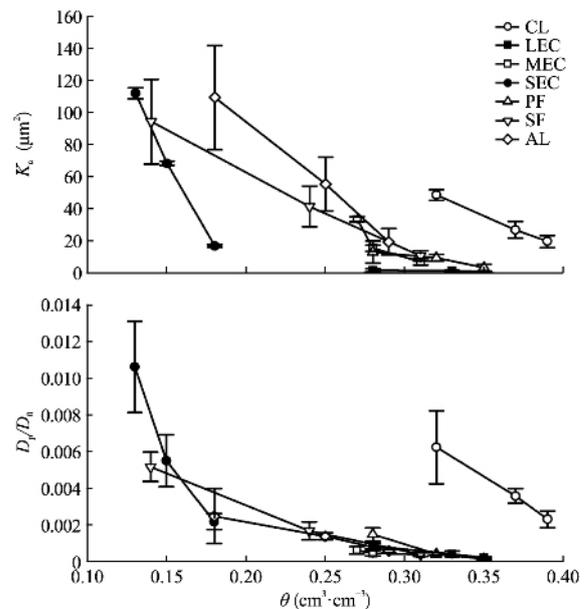


图 2 土壤含水量(θ)对不同土地利用方式下导气率(K_a)和相对气体扩散率(D_p/D_0)的影响

Fig.2 Effects of soil water content (θ) on air permeability (K_a) and relative gas diffusion (D_p/D_0) under different land use patterns.

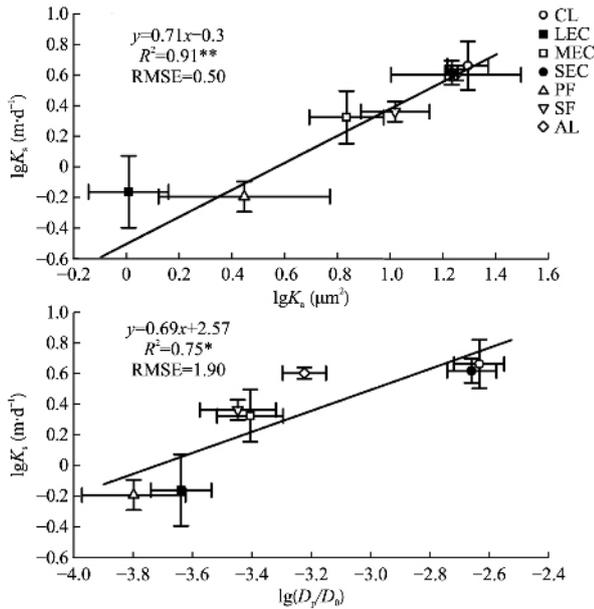


图3 田间持水量下导气率(K_a)、相对气体扩散率(D_p/D_0)与饱和导水率(K_s)对数的相关关系

Fig.3 Log-log plot of the relationship between soil air permeability (K_a), soil relative gas diffusion (D_p/D_0) at field water holding capacity and saturated hydraulic conductivity (K_s).

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

蚀沟;而坡下平坦,成为侵蚀土壤的沉积区,水土流失较轻。不同侵蚀程度农地 K_s 主要受土壤质地和有机质含量的影响,质地越砂, K_s 越大;有机质含量越大, K_s 越小。土壤侵蚀会增加 ρ_b ^[16],刘慧等^[17]研究也表明 ρ_b 随侵蚀强度的增加而递增,这与本研究结果一致。土壤侵蚀导致黏粒和粉粒含量减少,砂粒含量增加,土壤退化,土壤大孔隙增加, K_s 随之变大。Nikodem等^[18]研究了土壤侵蚀对高海拔断面土壤水力特性的影响,与本研究结果一致,最高的 K_s 值出现在侵蚀最严重的地方。由于侵蚀土壤颗粒的沉积过程,断面底部的 K_s 值下降。Jarvis等^[19]建立了全球在田间条件测得的导水率数据库,其数据表明,土壤有机碳含量与饱和导水率呈显著负相关。本研究中,未侵蚀农地土壤有机质含量最高, K_s 也最大。这是由于未侵蚀农地大豆种植密度大,土壤中含有大量有机高分子物质,与黏粒结合形成团粒结构,作物根系发达,对土壤孔隙状况具有良好的改善作用,总孔隙度最大,利于水分入渗,因此 ρ_b 最小, K_s 最大。Scheffler等^[20]的研究也证实了本研究结果,将牧场转变为大豆地后,表层土壤饱和导水率会显著增加。轻度侵蚀农地与未侵蚀农地的土壤质地和养分状况相近,测试结果的差异充分体现了种植作物对土壤水气传输性质的影响。由于玉米根系属于

须根系,对土体大多是横向穿插,而大豆根系为直根系,且大豆种植密度大,根系分布更多,对土体纵向穿插作用较强,可以更好地改善土壤孔隙和结构,增加水分入渗速率,从而减少地表径流,减缓土壤侵蚀。松林地黏粒含量较大,土壤紧实,土质黏重,阻碍水分下渗, K_s 较小。耕地退耕后,遭侵蚀破坏的土体构型渐趋恢复, ρ_b 减小^[21],而沙棘林地和撂荒地 ρ_b 大于轻度侵蚀农地和未侵蚀农地,其原因可能是农地翻耕的作用。撂荒地在自然演替下植物根系越来越发达,对土体的穿插作用增强,凋落物使得土壤有机质增加,促进土壤动物和微生物活动,有利于提高土壤孔隙度^[22],为 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 的提高创造了良好条件。土壤侵蚀导致黑土层变薄,土壤有机质下降,成为东北黑土区亟待解决的问题,本研究结果显示,种植大豆的未侵蚀农地、沙棘林地以及撂荒地等土地利用方式的水气传输性能优良,降水入渗快速,土壤侵蚀微弱。

3.2 导气率、相对气体扩散率与饱和导水率的相关关系

K_s 与 K_a 和 D_p/D_0 的相关关系表明,当土壤含水量为田间持水量时, K_s 与 K_a 和 D_p/D_0 存在对数相关关系,其表达式分别为 $K_s = 0.50K_a^{0.71}$ 和 $K_s = 367.54(D_p/D_0)^{0.69}$ 。 K_s 被广泛应用于水文模型中,用于评估化学侵蚀的风险,表征水的入渗特性,模拟地表径流。由于 K_s 空间变异性很大^[23],给精确测量带来困难,田间测量时通常通过增加重复的办法来提高准确度,试验操作繁琐、费力、耗时大。又因黑土土质黏重,遇水容易膨胀等性质,入渗过程缓慢,更增加了 K_s 测量的难度,因此,研究黑土区快速准确获得 K_s 的方法十分必要。相比于 K_s 的测量, K_a 和 D_p/D_0 的测定操作简单、方便快捷、用时少,不存在水分进入土体后的变化,对土壤的扰动破坏小。水分和空气都是通过土壤孔隙运动,因此许多学者利用 K_a 和 D_p/D_0 值进行 K_s 的推算。Iversen等^[24]建立了砂土、砂壤土和黏壤土3种质地土壤 K_s 与 K_a 的关系。Rahmati等^[25]研究了8种质地土壤(从砂土到粉黏壤土) K_s 与非饱和导水率的关系,提出了利用 K_a 预测非饱和导水率的模型,并用测量数据进行评估,其平均误差为3.7%,平均 R^2 为0.88。Masismelendez等^[26]通过对均质砂土原状土样 K_s 和 D_p/D_0 的测量,评价了 K_s 与 D_p/D_0 的潜在关系。王卫华等^[27]研究了陕西长武县黑垆土不同土层 K_a 与 K_s 的对数线性关系,其 R^2 均达到0.85以上,其中0~5 cm土层拟

合方程斜率和截距分别为 0.84 和 -3.55。韩蕾等^[4]通过环刀采样测量确定了陕西北部沙黄土 K_s 与 K_a 和 D_p/D_0 的对数关系式,其斜率分别为 27.75 和 3.91,截距分别为 -36.16 和 4.96。本研究中,土壤为黑土, K_s 与 K_a 和 D_p/D_0 的对数关系式中,斜率分别为 0.71 和 0.69,截距分别为 -0.30 和 2.57。这些关系式参数与前人研究结果存在较大差异,这可能是土壤质地差异所致,王卫华等^[27]、韩蕾等^[4]与本研究的土壤质地分别为粉壤土、砂土和粉黏土。因此, K_s 与 K_a 和 D_p/D_0 的关系式应根据不同土壤质地分别拟合适用于当地土壤的方程,本研究结果仅对东北黑土区 K_s 的预测提供参考。前人对于 K_s 与 K_a 和 D_p/D_0 关系研究所进行的试验大多为采集原状土样后在室内进行测量,本研究对于 K_s 、 K_a 和 D_p/D_0 的测量均在田间原位条件下进行,得到的结果更加可信。

4 结 论

本研究区未侵蚀农地容重显著低于其他样地,重度侵蚀农地显著高于其他样地;未侵蚀农地总孔隙度显著高于其他样地,重度侵蚀农地显著低于其他样地。除未侵蚀和重度侵蚀农地外,其余样地之间的土壤容重和总孔隙度无显著差异。土壤侵蚀和土地利用方式对东北黑土土壤水分特征曲线和水气传输特性影响显著。与未侵蚀农地相比,其他样地饱和导水率、导气率和相对气体扩散率均有所降低。未侵蚀农地、沙棘林地和撂荒地土壤水气传输性能较好,农地种植大豆、林地种植沙棘以及撂荒可以增加黑土土壤水分入渗速率,减少地表径流,减缓土壤侵蚀。

土壤导气率和相对气体扩散率随土壤含水量的增加而降低,不同土地利用方式的回归曲线的斜率不同。土壤导气率、相对气体扩散率与饱和导水率存在显著的对数相关关系,其表达式分别为 $K_s = 0.5 K_a^{0.71}$ 和 $K_s = 367.54 (D_p/D_0)^{0.69}$,通过测定导气率和相对气体扩散率可以估算饱和导水率。

参考文献

- [1] 张桃林,王兴祥. 土壤退化研究的进展与趋向. 自然资源学报, 2000, 15(3): 280-284 [Zhang T-L, Wang X-X. Progress and trend of soil degradation research. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(3): 280-284]
- [2] Alletto L, Coquet Y. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma*, 2009, 152: 85-94
- [3] 刘继龙,张振华,谢恒星,等. 烟台棕壤土饱和导水率的初步研究. 农业工程学报, 2007, 23(11): 129-132 [Liu J-L, Zhang Z-H, Xie H-X, et al. Preliminary study on the saturated hydraulic conductivity of brown forest soil in Yantai. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 129-132]
- [4] 韩蕾,潘雅文,朱志梅,等. 水蚀风蚀交错区不同土地利用方式的土壤水气传输特性. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1415-1422 [Han L, Pan Y-W, Zhu Z-M, et al. The characteristics of soil water and gas transport under different land use patterns in the water-wind erosion crisscross region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1415-1422]
- [5] 查小春,唐克丽. 黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化. 地理学报, 2003, 58(3): 464-469 [Zha X-C, Tang K-L. Soil erosion and change of soil properties in loess hilly forest land. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 464-469]
- [6] 高朝侠,徐学选,宇宙子,等. 黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1578-1584 [Gao C-X, Xu X-X, Yu M-Z, et al. Impact of land use tapes on soil macropores in the loess region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1578-1584]
- [7] Bodhinayake W, Si BC. Near-saturated surface soil hydraulic properties under different land uses in the St Denis National Wildlife Area, Saskatchewan, Canada. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 2835-2850
- [8] Zimmermann B, Elsenbeer H, De Moraes JM, et al. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222: 29-38
- [9] Dörner J, Dec D, Thiers O, et al. Spatial and temporal variability of physical properties of Aquands under different land uses in southern Chile. *Soil Use and Management*, 2016, 32: 411-421
- [10] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 38-39 [Shao M-A, Wang Q-J, Huang M-B. *Soil Physics*. Beijing: Higher Education Press, 2006: 38-39]
- [11] Ahmed F, Nestingen R, Nieber JL, et al. A modified Philip-Dunne infiltrometer for measuring the Field-Saturated hydraulic conductivity of surface soil. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13: 1-14
- [12] Mohammadi M, Vanclouster M. A simple device for field and laboratory measurements of soil air permeability. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83: 58-63
- [13] Kuncoro PH, Koga K. A simple and low cost method for measuring gas diffusivity and air permeability over a single soil cylinder. *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*, 2012, 120: 55-60
- [14] Jones HG. *Plant and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992
- [15] Currie JA. Gaseous diffusion in porous media. I. A non-steady state method. *British Journal of Applied Physics*, 1960, 11: 314-317

- [16] 刘晓冰,周克琴,苗淑杰,等. 土壤侵蚀影响作物产量及其因素分析. 土壤与作物, 2012, **1**(4): 205-211 [Liu X-B, Zhou K-Q, Miao S-J, et al. Crop yield and relevant factors as affected by soil erosion. *Soil and Crops*, 2012, **1**(4): 205-211]
- [17] 刘慧,魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价. 农业工程学报, 2014, **30**(20): 288-296 [Liu H, Wei Y-X. The influence and evaluation of soil erosion thickness on land productivity in black soil area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(20): 288-296]
- [18] Nikodem A, Kodesova R, Jaksik O, et al. Spatial and temporal variability of soil hydraulic properties of topsoil affected by soil erosion. EGU General Assembly Conference, Vienna, 2014: 6619
- [19] Jarvis N, Koestel J, Messing I, et al. Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**: 5185-5195
- [20] Scheffler R, Neill C, Krusche AV, et al. Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **144**: 281-289
- [21] 彭文英,张科利,陈瑶,等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究. 自然资源学报, 2005, **20**(2): 272-278 [Peng W-Y, Zhang K-L, Chen Y, et al. Study on the change of soil properties after returning farmland to forest on Loess sloping farmland. *Journal of Natural Resources*, 2005, **20**(2): 272-278]
- [22] 彭舜磊,由文辉,沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响. 农业工程学报, 2010, **26**(11): 78-84 [Peng S-L, You W-H, Shen H-T. Effect of vegetation succession on saturated hydraulic conductivity of soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26**(11): 78-84]
- [23] Wijaya K, Nishimura T, Setiawan B, et al. Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity in paddy field in accordance to subsurface percolation. *Paddy and Water Environment*, 2010, **8**: 113-120
- [24] Iversen BV, Moldrup P, Schjonning P, et al. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. *Soil Science*, 2001, **166**: 643-659
- [25] Rahmati M, Neyshaboury MR. Soil air permeability modeling and its use for predicting unsaturated soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, **80**: 1507-1513
- [26] Masismelendez F, Deepagoda TK, De Jonge LW, et al. Gas diffusion-derived tortuosity governs saturated hydraulic conductivity in sandy soils. *Journal of Hydrology*, 2014, **512**: 388-396
- [27] 王卫华,王全九,李淑芹. 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系. 农业工程学报, 2009, **25**(11): 120-127 [Wang W-H, Wang Q-J, Li S-Q. Soil air permeability and its relationship with water conductivity in Changwu area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, **25**(11): 120-127]

作者简介 赵旭,男,1996年生,硕士研究生。主要从事水分养分高效利用研究。E-mail: 1228818544@qq.com

责任编辑 杨弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



赵旭,樊军,付威. 土壤侵蚀与土地利用方式对黑土地土壤水气传输特性的影响. 应用生态学报, 2020, **31**(5): 1599-1606
Zhao X, Fan J, Fu W. Effects of soil erosion and land use patterns on the characteristics of soil water and gas transport in the black soil region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(5): 1599-1606