

晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价

刘 畅¹, 张建军^{1,2}, 张海博¹, 刘俊廷³, 高思远¹, 胡亚伟¹, 施政乐¹, 徐勤涛¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,山西 临汾 042200;3.黄河水利委员会山东水文水资源局,济南 250100)

摘要:为研究晋西黄土区退耕还林后不同植被覆盖下土壤的入渗特征及土壤质量评价,采用野外双环入渗法测定土壤的入渗特征,并测定不同地类土壤的容重、孔隙度、有机质、全氮等指标,使用相关性分析研究不同类型植被覆盖下土壤的入渗性能及其与土壤理化性质的相关关系,并将各地类的土壤理化性质进行主成分分析。结果表明:(1)植被类型对于土壤渗透速率影响较大,表现为天然次生林>刺槐×油松混交林>刺槐纯林>油松纯林>灌木林地>苹果园地>荒草地>农田(玉米地)。(2)退耕还林后,不同植被类型的土壤理化性质差异显著($P<0.05$),随着森林逐渐恢复,土壤容重下降,孔隙度及有机质等含量增加,土壤理化性质得以改善,入渗性能也有明显提高。土壤入渗特征与总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质和全氮含量呈极显著正相关($P<0.01$),与容重呈极显著负相关($P<0.01$),与速效磷呈显著负相关($P<0.05$)。(3)综合土壤入渗性能和土壤理化性质作为土壤评价指标,晋西黄土区退耕还林后不同植被类型土壤质量从高到低依次为次生林>刺槐×油松混交林>刺槐纯林>油松纯林>灌木林地>苹果园地>荒草地>农田。

关键词: 晋西黄土区; 土壤入渗; 土壤理化性质; 土壤质量
中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)05-0101-07
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.015

Characteristics of Soil Infiltration and Soil Quality Evaluation After Conversion of Farmland to Forest in Loess Region of Western Shanxi Province

LIU Chang¹, ZHANG Jianjun^{1,2}, ZHANG Haibo¹, LIU Juntao³,
GAO Siyuan¹, HU Yawei¹, SHI Zhengle¹, XU Qintao¹

(1.School of Soil and Water conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;
2.National Field Research Station of Forest, Linfen, Shanxi 042200; 3.Shandong Bureau of Hydrology and Water Resources of Yellow River Water Conservancy Commission, Jinan 250100)

Abstract: In order to study the soil infiltration characteristics and soil quality evaluation under different vegetation cover after returning farmland to forest in the loess region of Western Shanxi Province, the field double-ring infiltration method was developed for the determination of soil water infiltration characteristics. The soil bulk density, porosity, organic matter, and total nitrogen were studied. Correlation analysis was used to study the relationships between soil infiltration capability and the physical and chemical properties of soil. Principal component analysis was also used on the soil physical and chemical properties. The results showed that: (1) Vegetation type had a great influence on soil permeability rate, which was as follows natural secondary forest > Mixed forest of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* > *Robinia pseudoacacia* forest > *Pinus tabulaeformis* forest > Shrub > *Malus pumila* > waste grassland > farmland. (2) After the conversion of farmland to forest, the soil physical and chemical properties of different types of vegetation had significant differences. With the better degree of forest restoration, the soil bulk density decreased, and the contents of porosity and organic matter increased, the soil physical and chemical properties was also gradually improved. Soil infiltration characteristics were significantly positively correlated with total porosity, non-capillary porosity, organic matter and total nitrogen content ($P < 0.01$), significantly negatively correlated with bulk density ($P < 0.01$), and significantly negatively correlated with available phosphorus ($P <$

收稿日期:2021-03-22
资助项目:中央高校基本科研业务专项(2021BLRD04)
第一作者:刘畅(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:liu97chang@163.com
通信作者:张建军(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持、森林水文、植被恢复、生态效益评价研究。E-mail:zhangjianjun@bjfu.edu.cn

0.05)。With the conversion from farmland to waste grassland, shrub and arboreal forest, soil physical and chemical properties were improved and soil permeability was also gradually enhanced. (3) Soil infiltration performance and soil physical and chemical properties were used as soil evaluation indexes. The order of soil quality of different vegetation types from high to low was as follows natural secondary forest > Mixed forest of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* > *Robinia pseudoacacia* forest > *Pinus tabulaeformis* forest> Shrub > *Malus pumila* > waste grassland > farmland.

Keywords: the loess region of western Shanxi Province; soil infiltration; physical and chemical properties of soil; soil quality

众所周知,黄土高原植被退化,水土流失严重。1999 年以来,政府实施的退耕还林(草)工程,大范围进行植被栽植,有效遏制了水土流失。已有研究^[1]表明,林草植被措施改善土壤的结构和肥力,对水土保持的贡献率达 57%,有效地提高了黄土高原的土壤质量,改善当地的生态环境。

土壤质量是依据土壤特性进行土壤评价的综合指标。关于土壤质量评价的研究已有很多。宿婷婷等^[2]应用容重、有机质等土壤理化性质评价了宁夏黄土丘陵区典型草原不同恢复措施下的土壤质量;黄婷等^[3]以陕北黄土丘陵区为研究区,运用综合评价法分析并评价不同林龄刺槐群落土壤质量;金晶炜等^[4]以土壤理化因子作为土壤质量评价指标,评价了不同恢复年限的紫花苜蓿草地和柠条林地对土壤质量的影响。这些研究忽略了土壤入渗特征对土壤质量的作用,但有研究^[5-6]表明,土壤入渗特征也是土壤质量评价的重要指标。因此,从土壤入渗特征、土壤理化性质等多角度对黄土高原退耕还林后不同植被类型土壤质量进行综合评价尤为重要。

土壤入渗是指水分从土壤表面进入土壤中的过程,是降水、地表水、土壤水及地下水相互转换过程中的重要环节,是反映土壤质量标准的重要因素之一。植被恢复可以改善土壤入渗性能^[7],与农田、灌草地等地类相比,林地的入渗性能更好^[8]。因为林地的地下根系更为丰富,植物根系穿透土壤产生的孔隙会扩大水分渗透通道^[9]。已有研究^[10-11]表明,土壤理化性质是引起土壤入渗特征出现差异的主要因素之一,土壤入渗特征与土壤理化性质差异具有较强的相关性;陈家林等^[12]研究表明,刺槐、侧柏等林地的渗透性能大于裸地,其中总孔隙度对渗透的影响作用最大;胡阳等^[13]研究表明,植被类型对土壤入渗的影响较大,林灌地土壤容重低,非毛管孔隙度大,土质疏松,入渗性能优于荒草地。土地利用类型发生变化,土壤容重、孔隙状况、土壤含水量以及有机质含量等理化性质也会相应变化,进而直接或间接影响土壤入渗特征^[10,13]。黄土高原退耕还林(草)后不同的植物恢复措施对土壤入渗性能及土壤质量的改善作用究竟有

多大? 如何定量评价等诸多问题仍然需要持续开展科学研究和探讨。本文以晋西黄土区天然次生林、混交林、纯林、灌木林、果园、荒草地和农地为研究对象,研究其土壤入渗特征,分析土壤入渗与理化性质之间的关系,评价不同植被类型下的土壤质量,以期为黄土高原水土保持和生态恢复提供理论支撑。

1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域,海拔 900~1 590 m,地理坐标为 36°14'27"—36°18'23"N,110°39'45"—110°47'45"E,属于梁状丘陵沟壑区,呈由西向东走向,面积 38 km²。该地区气候系黄土高原东南部温暖半湿润区,年均气温 10℃,年平均降水量 579 mm,土壤类型以褐土为主。土地利用类型主要有林地、果园、农地、灌草地等。主要植被类型有:(1)由白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、辽东栎(*Quercus wutaishanica* Mary)、山杨(*Populus davidiana* Dode)等组成的天然次生林;(2)由刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)等组成的人工林;(3)苹果(*Malus pumila* Mill.)、梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.)等经济林;(4)黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、连翘(*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl)等灌木林;(5)委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)等草本植物。

2 研究方法

2.1 样地设置

在研究流域内选取有代表性和典型性且坡度、坡向、海拔等基本相同的次生林、刺槐纯林、油松纯林、刺槐×油松混交林、苹果经济林、灌木林、荒草地作为研究对象,将农地(玉米地)作为对照,在每种样地内设置面积为 20 m×20 m 的样方,在样方内进行植物群落调查及每木检尺,样地基本情况见表 1。

2.2 入渗试验

野外入渗试验于 2018 年 6—7 月进行,使用双环

入渗法测定入渗过程。在样方的对角线上均匀选取地势较平整的 3 个人渗试验点,去除试验点地表植被及枯落物,用橡胶锤将内环直径为 8 cm、外环直径为 15 cm 的环刀打入土中放置一段时间后进行测定。

表 1 研究样地概况

植被类型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	林龄/a	胸径 (地径)/cm	树高/m	郁闭度 (覆盖度)/%
次生林	1138	19	阳坡	16	10.58	6.52	82
刺槐林	1140	18	阳坡	16	12.81	8.31	75
油松林	1168	22	阳坡	17	10.34	7.01	75
刺槐×油松林	1125	15	阳坡	15	7.95	5.54	85
苹果园	1163	21	阳坡	15	10.12	3.05	80
灌木林	1062	23	阳坡	15	3.23	2.10	90
荒草地	974	16	阳坡				
农田(对照)	926	14	阳坡				

2.3 土壤样品采集

在每个样方上、中、下 3 个坡位选择较为平整的地段布设样点,用体积为 100 cm³ 的环刀在每个样点土壤剖面采集 0—20 cm 深度的原状土 2 个,备测土壤容重、土壤含水量、非毛管孔隙度、总孔隙度等物理指标。在环刀取样的同时取土壤样本放入自封袋中保存,备测土壤有机质含量、pH、全氮、全磷、速效磷和速效钾等指标。

2.4 测定方法

用环刀浸水法测定土壤容重、总孔隙度和非毛管孔隙度;烘干称重法进行土壤初始含水量的计算;重铬酸钾容量法(加热法)测定有机质含量;酸度计法测定土壤 pH;半微量凯氏定氮法测定全氮含量;氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法测定全磷含量;NH₄ F HCl 浸提—钼锑抗比色法测定速效磷含量;NH₄ OAc 浸提—火焰光度法测定速效钾含量,具体方法参照文献[15]。

2.5 数据处理与分析

利用 Excel 2010、SPSS 25.0、Origin 2019 和 Canoco 5.0 软件进行数据统计分析、绘制图表等。运用单因素方差分析法(ANOVA)对退耕后不同地类的入渗特征及土壤理化性质进行差异性分析。运用 Pearson 相关分析和线性冗余分析(RDA)研究土壤渗透特性与理化性质的相关关系。利用主成分分析(PCA)进行退耕后不同地类的土壤质量评价。

3 结果与分析

3.1 不同地类土壤入渗特征

土壤的入渗性能不仅影响地表径流,也影响着植物根区的水分状况。由图 1 可知,退耕还林后,不同植被类型土壤入渗过程表现出一致的变化规律,在入渗的初始阶段,土壤的入渗速率最大,但随着入渗过程的持续而呈现出急剧减少的趋势,当入渗经历一段

测定时通过称重法向环刀内加入一定重量的水(相当于 1 cm 厚的水层)后开始计时,保持内外环水位一致,并防止发生侧漏,试验共进行 60 min,记录初始入渗速率、各时段入渗率、稳定入渗率^[14]。

时间后,土壤入渗速率不再有明显变化。根据入渗时间,可以将入渗过程划分为渗润阶段(0~10 min)、渗漏阶段(10~40 min)和渗透阶段(40 min 后),入渗初期由于分子力作用,土壤与水分作用形成薄膜水,在此阶段入渗速率较大且变化较快;渗漏阶段下渗的水分由于受土壤毛管孔隙的引力及其自身重力的作用,土壤间的孔隙被逐步填满,入渗速率逐渐放缓;在渗透阶段,土壤水分达到饱和状态,水便在重力作用下运动,入渗速率在此阶段达到稳定^[16]。由图 2 可知,在前 10 min,由于初始阶段入渗速率较大,入渗总量斜率在此阶段变化较快,40 min 后,土壤入渗速率逐渐达到稳定状态,入渗总量斜率几乎没有变化。

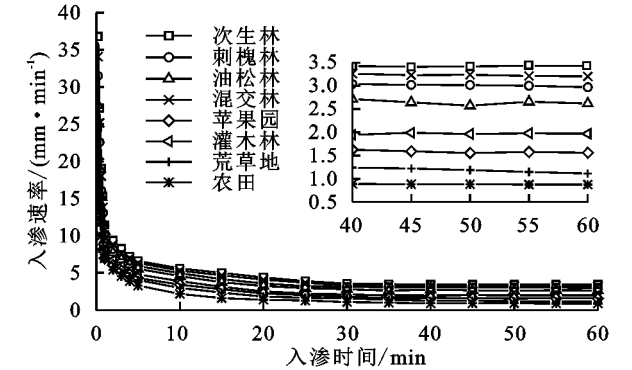


图 1 不同植被类型土壤入渗特征

由表 2 可知,黄土高原退耕还林后不同植被类型土壤的入渗速率和入渗总量依次为次生林>油松×刺槐混交林>刺槐林>油松林>灌木林>苹果园>荒草地>农田。各地类的初渗速率、稳渗速率、平均入渗速率和入渗总量均有显著差异。林地土壤入渗特征要明显优于农田和草地,而林地中又以天然次生林最优。农田和荒草地由于人类干扰的影响,土壤孔隙结构比林地差,因而入渗性能较差。土壤入渗性能的改善对于提高森林植被的生产力,防止因超渗产流而形成的土壤流失等具有重要意义。

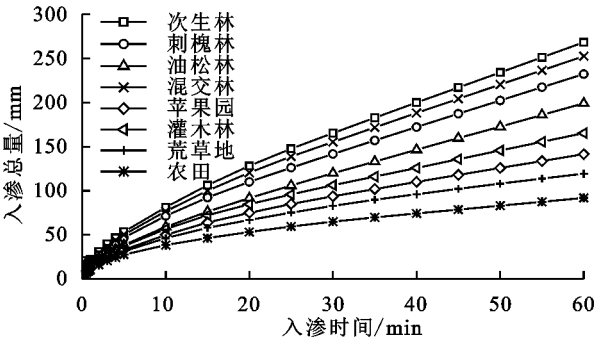


图 2 不同植被类型土壤入渗总量变化

3.2 退耕后不同地类的土壤理化性质

由表 3 和表 4 可知,退耕还林后,各地类土壤理化性质的变化规律不同。由农田退耕为灌木林和林地之后,不同地类的容重、孔隙度、有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾均差异显著($P<0.05$),林地的土壤理化性质优于农田。

各地类的土壤容重范围为 $1.12\sim1.28\text{ g/cm}^3$,依次为天然次生林<混交林<刺槐林<油松林<苹果园<灌木林<荒草地<农田。非毛管孔隙度与容重排序相反,其变化范围为 $3.99\%\sim6.62\%$;土壤的总孔隙度为 $46.75\%\sim55.07\%$,其变化规律与非毛管孔隙度相似。总体来说,土壤容重表现为林地小于农田和荒草地,土壤孔隙度呈现出相反的规律^[17]。

表 2 不同植被类型土壤入渗特征

植被类型	初渗速率/ (mm·min ⁻¹)	稳渗速率/ (mm·min ⁻¹)	平均速率/ (mm·min ⁻¹)	入渗总量/ (mm·min ⁻¹)
次生林	21.96±0.47a	3.43±0a	4.47±0.08a	268.31±4.82a
刺槐林	18.65±0.47c	3.00±0.02c	3.87±0.08c	232.19±4.70c
油松林	16.59±1.12d	2.62±0.01d	3.32±0.05d	198.99±3.19d
混交林	20.38±0.72b	3.22±0.02b	4.21±0.06b	252.48±3.43b
苹果园	12.49±0.27f	1.56±0.01f	2.36±0.01f	141.44±0.67f
灌木林	14.73±0.62e	1.97±0e	2.76±0.01e	165.31±0.52e
荒草地	12.01±0.24f	1.15±0.01g	1.99±0.03g	119.36±1.87g
农田	10.55±0.55g	0.88±0.01h	1.53±0.01h	91.83±0.47h

注:表中数据为平均值±标准差;同列中不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

表 3 不同植被类型的土壤物理性质

植被类型	总孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	容重/ (g·cm ⁻³)	含水率/%
次生林	55.07±0.83a	6.62±0.54a	1.12±0.10c	0.17±0.03a
刺槐林	53.56±3.42a	5.83±0.90ab	1.14±0.02c	0.14±0.04a
油松林	53.24±2.77a	5.66±0.46b	1.16±0.05bc	0.10±0.01a
混交林	54.52±1.14a	6.17±0.60ab	1.13±0.02c	0.14±0.05a
苹果园	52.81±0.35a	5.30±0.20bc	1.18±0.02bc	0.10±0.03a
灌木林	52.18±1.73a	5.52±0.11b	1.16±0bc	0.15±0a
荒草地	46.75±0.76b	4.57±0.31c	1.26±0.11b	0.18±0.05a
农田	47.75±2.85b	3.99±0.31c	1.28±0.07ab	0.17±0.04a

表 4 不同植被类型的土壤化学性质

植被类型	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH
次生林	17.47±2.26a	1.19±0.01a	0.53±0.06ab	2.81±0.45c	179.17±28.92ab	9.03±0.35a
刺槐林	14.67±2.34b	1.17±0.11a	0.44±0.04ab	2.04±0.07c	204.83±45.50a	8.85±0.33a
油松林	13.07±1.23bc	1.08±0.10a	0.42±0.06ab	2.20±0.48c	130.28±18.46b	8.92±0.16a
混交林	16.72±0.29ab	1.18±0.01a	0.51±0.07ab	2.44±0.86c	136.31±6.38b	8.50±0.48a
苹果园	12.19±0.59c	0.98±0.68a	0.54±0.11a	5.07±1.23b	69.50±22.25c	8.96±0.21a
灌木林	12.91±0.78bc	1.02±0.18a	0.36±0.21b	2.66±1.52c	200.17±75.83a	8.80±0.57a
荒草地	11.38±1.00c	0.41±0.01b	0.50±0.06ab	5.34±2.01b	100.75±2.84bc	9.00±0.11a
农田	10.94±0.76c	0.49±0.09b	0.37±0.01b	8.70±0.31a	126.50±33.13b	9.02±0.09a

不同造林树种在生长过程中从土壤中吸收的营养元素不尽相同,植被与土壤长期相互作用导致不同地类的化学性质有很大差异。由表 4 可知,不同地类土壤有机质含量为 $10.94\sim17.47\text{ g/kg}$,且表现为天然次生林>混交林>刺槐林>油松林>灌木林>苹果园>荒草地>农田。土壤全氮含量为 $0.41\sim1.19\text{ g/kg}$,表现为天然次生林>混交林>刺槐林>油松林>灌木林>苹果园>农田>荒草地。总体来说,林地的有机质和全氮含量最大,荒草地和农田最低。土壤中大部分氮素是有机质的一部分,全氮与土壤有机质含量显著相关^[18]。植物根系生长吸收的营养物质及地表枯落物通过分解作用,将养分释放到土壤中,促使土壤理化性质改善。全磷、速效磷、速效钾的变

化特征与植被类型相关,但是含量变化没有明显规律。磷素与钾素含量受成土过程、土壤母质、耕作和施肥措施的影响,在土壤本身含量不足的情况下,植被恢复对其改善作用非常有限。

3.3 土壤入渗性能与土壤理化性质的相关性

由表 5 可知,土壤渗透特性与土壤各理化因子的相关关系中,土壤入渗特征与孔隙度、全氮、全磷、速效钾、有机质呈正相关,与土壤容重、速效磷、含水率、pH 呈负相关,但显著性并不相同。土壤入渗特征与总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质和全氮含量呈极显著正相关($P<0.01$),与容重呈极显著负相关($P<0.01$),与速效磷呈显著负相关($P<0.05$)。

由图 3 和表 6 可知,本研究所选指标共解释土壤

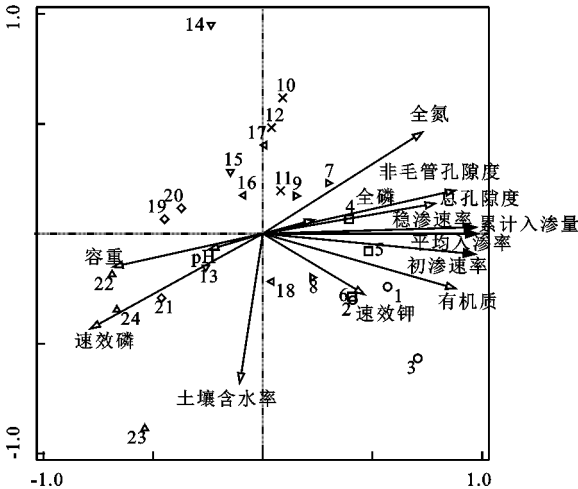
入渗特征的 95.5%,有机质含量和非毛管孔隙度与各入渗指标正相关性最强。各土壤环境因子对土壤入渗特征影响贡献度表现为有机质含量最大,为 77%,其次为非毛管孔隙度、速效磷、容重、总孔隙度等。说

明土壤非毛管孔隙度、土壤有机质含量是影响土壤入渗特征的主要因素。土壤入渗受土壤孔隙的影响,但是土壤有机质又会改变土壤的孔隙状况,间接影响土壤的入渗性能^[19]。

表 5 土壤入渗特征与土壤理化因子相关关系分析

土壤入渗特征	总孔隙度	非毛管孔隙度	容重	土壤含水率	有机质	全氮	全磷	速效磷	速效钾	pH
初渗速率	0.839**	0.939**	-0.884**	-0.043	0.975**	0.833*	0.330	-0.787*	0.563	-0.443
稳渗速率	0.891**	0.951**	-0.926**	-0.181	0.940**	0.894**	0.295	-0.843**	0.554	-0.467
平均入渗率	0.877**	0.957**	-0.918**	-0.138	0.961**	0.876**	0.348	-0.829*	0.540	-0.468
入渗总量	0.877**	0.957**	-0.918**	-0.138	0.961**	0.876**	0.348	-0.829*	0.540	-0.468

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。



注:○为次生林;□为刺槐林;△为油松林;×为混交林;▽为苹果园;△为灌木林;◇为荒草地;◁为农田。

图 3 土壤入渗特征与土壤理化因子 RDA 分析

表 6 土壤因子对土壤入渗特征的贡献度

土壤因子	解释率/%	F	P
有机质	77.0	61.1	0.002**
非毛管孔隙度	17.9	38.3	0.002**
速效磷	1.5	3.6	0.074
容重	0.7	1.7	0.220
总孔隙度	1.1	3.0	0.096
速效钾	0.4	1.0	0.354
土壤含水率	0.4	1.3	0.266
全氮	0.7	2.1	0.160
全磷	0.2	0.5	0.480
pH	0.1	0.3	0.578

3.4 退耕后不同地类土壤质量综合评价

土壤入渗性能和土壤理化性质是土壤的基本属性之一,为了综合评价退耕还林后不同植被恢复措施地类的土壤质量,将土壤入渗特征和土壤物理化学性质作为评价指标,在 SPSS 软件中进行主成分分析,按照特征值需>1 的原则,提取了前 3 个公因子,其特征值分别为 9.862,1.769,1.203,累积方差贡献率达到 91.67%(表 7),说明提取出来的 3 个主成分可以很好地反映评价指标的量度。其中,土壤入渗指标、总孔隙度、非毛管孔隙度、容重、全氮、有机质和速

效磷在第 1 主成分中发挥了重要作用,土壤含水率、速效钾在第 2 主成分发挥了重要作用,全磷在第 3 主成分发挥主要作用。将提取出来的 3 个主成分记作 P_1 、 P_2 、 P_3 ,其主成分方程为:

$$P_1=0.306X_1+0.313X_2+0.313X_3+0.313X_4+0.299X_5+0.312X_6-0.310X_7-0.083X_8+0.296X_9+0.301X_{10}+0.101X_{11}-0.280X_{12}+0.171X_{13}-0.165X_{14}$$

$$P_2=0.098X_1+0.050X_2+0.048X_3+0.048X_4-0.139X_5-0.051X_6+0.056X_7+0.577X_8+0.067X_9-0.080X_{10}-0.505X_{11}-0.011X_{12}+0.598X_{13}+0.014X_{14}$$

$$P_3=0.188X_1+0.069X_2+0.129X_3+0.129X_4-0.143X_5+0.075X_6+0.116X_7+0.507X_8+0.280X_9-0.223X_{10}+0.579X_{11}+0.204X_{12}-0.160X_{13}+0.315X_{14}$$

表 7 退耕后不同地类土壤质量 PCA 分析

项目	P_1	P_2	P_3
初渗速率(X_1)	0.306	0.098	0.188
稳渗速率(X_2)	0.313	0.050	0.069
平均入渗率(X_3)	0.313	0.048	0.129
累积入渗量(X_4)	0.313	0.048	0.129
总孔隙度(X_5)	0.299	-0.139	-0.143
非毛管孔隙度(X_6)	0.312	-0.051	0.075
容重(X_7)	-0.310	0.056	0.116
土壤含水率(X_8)	-0.083	0.577	0.507
有机质(X_9)	0.296	0.067	0.280
全氮(X_{10})	0.301	-0.080	-0.223
全磷(X_{11})	0.101	-0.505	0.579
速效磷(X_{12})	-0.280	-0.011	0.204
速效钾(X_{13})	0.171	0.598	-0.160
pH(X_{14})	-0.165	0.014	0.315
特征值	9.862	1.769	1.203
贡献率/%	70.441	12.636	8.592
累计贡献率/%	70.441	83.078	91.670

在 SPSS 软件中使用 Z-score 法对各评价指标进行标准化处理,将标准化之后的参数代入主成分方程,计算得到不同地类各主成分的得分情况。计算

各主成分所占权重,进而得出不同植被类型土壤质量的综合得分(公式(3))。由表 8 可知,退耕还林后,不同造林模式下土壤的综合得分的排序为次生林(2.990)>混交林(2.444)>刺槐林(1.777)>油松林(0.463)>灌木林(0.092)>苹果园(-1.338)>荒草地(-2.784)>农田(-3.642)。

研究以 3 个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重,得到土壤质量综合评价函数为:

$$P=\frac{9.862P_1+1.769P_2+1.203P_3}{12.834}$$

(3)

表 8 不同植被类型的土壤质量评价

植被类型	P_1	P_2	P_3	得分	排序
次生林	3.572	0.556	1.801	2.990	1
刺槐林	2.189	0.954	-0.395	1.777	3
油松林	0.871	-0.741	-1.112	0.463	4
混交林	3.27	-0.532	0.044	2.444	2
苹果园	-1.232	-2.680	-0.236	-1.338	6
灌木林	0.036	1.432	-1.419	0.092	5
荒草地	-3.778	-0.028	1.308	-2.784	7
农田	-4.928	1.039	0.009	-3.642	8

4 讨论

地表植被类型会显著影响土壤入渗性能^[20]。本研究发现,黄土高原退耕还林后,不同地类的初渗速率、平均入渗速率、稳渗速率和入渗总量均存在显著差异,入渗性能表现为林地优于荒草地和农田,这与彭舜磊等^[8]、公博等^[21]的研究结果相似。林地地下根系较发达,使土壤变得疏松,孔隙结构改善,因而林地的入渗速率更大。林地中又以天然次生林的入渗性能最优,因为自然恢复林郁闭度较好,枯落物及腐殖质较厚,根系更为发达,涵养水分的能力更强。

植被类型不同,在其土壤层测得的理化指标也存在差异,容重、孔隙度、全氮、有机质等均与植被类型表现出显著相关性。当植被类型由农田演替为灌草地、林地时,土壤容重下降,孔隙度及有机质等含量增加,土壤理化性质得以逐步改善。张晓霞等^[17]研究表明,黄土高原退耕还林之后,达到一定年限自然恢复林对土壤物理性质的改善程度均大于其他林地,这与本研究结果相似。此外,本研究发现,土壤渗透特性与孔隙度、容重、有机质、全氮等显著相关,其中有机质和非毛管孔隙度是决定土壤入渗性能的主要影响因素,土壤孔隙度直接影响着土壤中水分运动通道的多寡和水分保存场所的多少,非毛管孔隙是重力水运动的通道,非毛管孔隙越多,水分入渗速率越快,渗透的深度也越大^[22]。有研究^[23]指出,随着入渗过程的进行,土壤的渗透性能由

孔径超过 0.02 mm 的非毛管孔隙决定。土壤中有有机质是反映土壤肥力的重要指标,植物根系繁杂,可以有效改善土壤的孔隙结构,枯落物和衰亡的根系腐解可为土壤输入有机质等物质^[16]。有机质中的腐殖物质使土壤黏结力增强,进而促进团粒结构的形成^[10],土壤物理性状得以改善,因而有机质含量增加会间接改善入渗情况^[20]。除以上因素之外,植物林龄、密度以及海拔、坡度、坡向等因子也影响土壤的入渗和理化性质,还需进一步考虑。

土壤质量是评价土壤健康质量、土壤肥力质量和环境质量的综合度量^[24],本研究从水分和养分的角度综合考虑,可以更全面地评价土壤质量。本研究中林地的土壤质量高于荒草地和农田,且次生林和混交林的土壤质量最佳,与姚小萌等^[25]研究结果相似。处于正向演替且植被等级高的森林类型,群落结构更复杂,物种组成更丰富,凋落物分解更快,具有较强的养分循环与富集功能^[24]。纯林和人工经济林具有森林脆弱性,且森林质量整体不高。本研究仅从土壤入渗和理化性质 2 个方面评价土壤质量,但未考虑根系特征以及生物属性对土壤质量的影响,今后应考虑更多因素,加强研究,以期完善晋西黄土区退耕还林后不同植被类型土壤质量评价体系。

5 结论

晋西黄土区不同植被类型的入渗速率和土壤理化性质均存在显著差异($P<0.05$),次生林、混交林、纯林的入渗性能及理化性质优于荒草地和农田。土壤入渗特征与总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质和全氮含量呈极显著正相关($P<0.01$),与容重呈极显著负相关($P<0.01$),与速效磷呈显著负相关($P<0.05$),其中土壤有机质和非毛管孔隙度是最主要的影响因子。综合土壤入渗特征和土壤理化性质的主成分分析结果显示,天然次生林和混交林相较于纯林、经济林等更有利于土壤质量的改善。因此,在进行植被恢复时要尊重森林自然演替规律,尽量减少人为干扰,采用适度的管理措施促进森林向顶级群落类型演替,以增加凋落物储量和分解速度,进而达到森林土壤质量有效提升的效果。

参考文献:

[1] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.

[2] 宿婷婷,马红彬,周瑶,等.黄土丘陵典型草原土壤理化性质对生态恢复措施的响应[J].草业学报,2019,28(4):34-46.

[3] 黄婷,刘政鸿,王钰莹,等.陕北黄土丘陵区不同立地条

件下刺槐群落的土壤质量评价[J].干旱区研究,2016,33(3):476-485.

[4] 金晶炜,苏纪帅,白于,等.宁南山区土壤质量对人工植被恢复模式的响应[J].农业工程学报,2014,30(16):283-289.

[5] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.露天煤矿排土场复垦区不同植被类型土壤质量评价[J].生态环境学报,2019,28(4):850-856.

[6] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型土壤渗透性[J].东北林业大学学报,2013,41(3):57-62.

[7] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.

[8] 彭舜磊,梁亚红,陈昌东,等.伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测[J].水土保持研究,2013,20(4):29-33.

[9] 曾江敏,何丙辉,李天阳,等.喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤入渗特征[J].水土保持学报,2019,33(4):58-64.

[10] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(5):1610-1620.

[11] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, China[J].Journal of Soils and Sediments,2019,19(3):1456-1466.

[12] 陈家林,郭二辉,杨果果,等.太行山低山丘陵区不同水土保持林地土壤渗透性能及其影响因素研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(10):34-40.

[13] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(3):597-604.

[14] 崔艳红,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析[J].北京林业大学学报,2021,43(1):77-87.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[16] 王珊珊,毕华兴,刘俊,等.晋西黄土区不同密度刺槐林土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2020,34(5):231-237,243.

[17] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J].生态学报,2017,37(2):416-424.

[18] 葛楠楠,石芸,杨宪龙,等.黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J].应用生态学报,2017,28(5):1626-1632.

[19] Shao Q, Baumgartl T. Field evaluation of three modified infiltration models for the simulation of rainfall sequences[J].Soil Science,2016,181(2):45-56.

[20] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].生态学报,2019,39(24):9111-9118.

[21] 公博,师忱,何会宾,等.冀北山区 6 种人工林的林地水源涵养能力[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):165-170.

[22] Li X Y, Contreras S, Solé-Benet A, et al. Controls of infiltration-runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain[J].Catena,2011,86:98-109.

[23] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):33-36.

[24] 王晓荣,胡文杰,庞宏东,等.湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J].中南林业科技大学学报,2020,40(11):156-166.

[25] 姚小萌,牛桢枫,党珍珍,等.黄土高原自然植被恢复对土壤质量的影响[J].地球环境学报,2015,6(4):238-247.

(上接第 100 页)

[19] 张家明,徐则民,李峰,等.植被发育斜坡土体大孔隙结构多尺度特征[J].山地学报,2019,37(5):717-727.

[20] van Genuchten M T A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J].Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.

[21] Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc,2004.

[22] 吕国顺.非饱和黄土渗透特性试验研究[D].兰州:兰州大学,2020.

[23] 王鑫皓,王云琦,马超,等.根系构型对土壤渗透性能的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):73-82.

[24] 梅雪梅.晋西黄土区坡地土壤水分时空分布及影响机制研究[D].北京:北京林业大学,2019.