

黄土丘陵沟壑区退耕年限对根—土复合体抗剪强度的影响

邢书昆¹, 张光辉^{1,2}, 朱平宗¹

(1.北京师范大学地理科学学部,北京 100875;2.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)

摘要:“退耕还林(草)”工程的有效实施,导致黄土高原植被迅速恢复,势必会引起植物根系和土壤理化性质变化,影响根—土复合体抗剪强度。为探究植被恢复年限对根—土复合体抗剪强度的潜在影响,在陕西省安塞区纸坊沟小流域选择 6 个不同退耕年限(5,12,20,27,37,46 年)的撂荒地和 1 个坡耕地,进行不同土层深度(0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm)根—土复合体原位剪切试验,同时测定根系特性和土壤理化性质。结果表明,随着退耕年限增加,0—50 cm 土层根—土复合体抗剪强度均值呈“S”形增大趋势(51.80~124.01 J/m²),与坡耕地相比,抗剪强度依次增加 2.5%,54.6%,48.7%,86.5%,139.4%和 129.3%。除坡耕地外,随着土层深度增加,根系密度明显减少,根—土复合体抗剪强度逐渐下降。根—土复合体抗剪强度与土壤有机质含量、根长密度和根质量密度呈对数正相关关系,与团聚体稳定性和有效根密度呈线性正相关关系。通径分析表明,团聚体稳定性、根质量密度和有机质含量是影响根—土复合体抗剪强度的关键因素。研究结果为评估植被恢复的水土保持效益及生态服务功能、揭示根—土复合体抗剪强度随退耕年限变化的动力机制提供理论基础。

关键词:黄土高原;植被恢复;原位剪切试验;根系特性;土壤性质

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0041-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.007

Effects of Vegetation Restoration Age on Shear Strength of Root-soil System in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau

XING Shukun¹, ZHANG Guanghui^{1,2}, ZHU Pingzong¹

(1.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: The effective implementation of the “grain-for-green” project has rapidly restored vegetation on the Loess Plateau, which will inevitably trigger the changes in plant roots and soil physical and chemical properties, and further affect the shear strength of root-soil system. To investigate the potential impacts of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system, six abandoned farmlands with different restoration age (5, 12, 20, 27, 37 and 46 years) and a slope farmland were selected as testing sites in Zhifanggou small watershed in Ansai, Shaanxi province. The in-situ shear tests were conducted in five different soil depths (0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 cm), and root characteristics and soil physical and chemical properties were measured simultaneously. The results showed that the average shear strength of 0—50 cm soil layers increased as a sigmoid curve from 51.80 J/m² to 124.01 J/m² with the increasing of vegetation restoration age. Compared with slope farmland, the shear strength of root-soil system increased by 2.5%, 54.6%, 48.7%, 86.5%, 139.4% and 129.3% for abandoned farmlands with different restoration ages, respectively. The root density decreased significantly with the increasing of soil depth in the abandoned farmlands, which induced decrease in the shear strength of root-soil system. The shear strength of root-soil system was logarithmically positively correlated with organic matter content, root length density and root mass density, and linearly positively correlated with aggregate stability and root density. Path analysis showed that aggregate stability, root mass density and organic matter content were the key factors affecting the shear strength of root-soil system. The results could provide a theoretical basis for evaluating water and

收稿日期:2021-01-31

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504702);国家自然科学基金重点项目(41530858)

第一作者:邢书昆(1996—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 201921051020@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张光辉(1969—),男,甘肃静宁人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

soil conservation benefit and ecological service functions of vegetation restoration, and revealing the dynamic mechanism of changes in shear strength of root-soil system with the vegetation restoration age.

Keywords: the Loess Plateau; vegetation restoration; in situ shear test; root characteristics; soil properties

近年来,生态环境保护与修复越来越受到重视。利用植被进行固土护坡、防治水土流失,具有低成本、易实施、景观效果和环境效益突出等优点^[1],正逐步被广泛应用。植被不仅可通过冠层截留降雨、茎秆和枯落物减缓地面径流,增加入渗,也可利用其错综复杂的地下根系穿插、缠绕土壤,与土壤紧密结合形成根—土复合体,显著提高其抵抗水力、重力等剪切破坏的能力^[2-3],增强边坡稳定性,发挥显著的阻控水土流失等积极作用^[4-5]。因此,对根—土复合体抗剪强度开展系统研究,对于评估植被恢复的水土保持效益及生态服务功能,揭示根—土复合体提升坡体稳定性的动力机制,具有重要的理论和实践意义。

根—土复合体抗剪强度与根系系统和土壤间复杂的相互作用密切相关^[6],陈丽华等^[7]研究发现,植物根系主要通过浅层细根加筋效应和深层粗根锚固效应,以及植物蒸腾耗水降低坡体孔隙水压力,增加边坡土体抗剪强度;Yildiz 等^[8]较为系统地分析了前人的研究结果认为,根系一方面穿过坡体潜在滑动面通过机械加固作用提升土体稳定性;另一方面通过吸收根系周围的土壤水分,改变土壤微结构,增加土壤颗粒之间的吸附力而强化土壤稳定性;Fan 等^[9]在不同土壤含水量(8%~22%)条件下测定刺田菁根—土复合体和裸地土壤抗剪强度发现,随着土壤含水量增加,根—土复合体抗剪强度和裸地土壤抗剪强度均明显下降,但二者的差值显著增加;Comino 等^[10]在不同土壤含水量(48.8%,36.0%,23.1%,28.5%)的条件下,研究生长 8~16 个月的 5 种草本群落根—土复合体和裸地的抗剪切强度发现,土壤颗粒越细,穿过剪切面的根系数量越多,抗剪强度越大,并筛选出草甸羊茅和百脉根作为该地区适宜种植的草本植物;王月

等^[11]以小叶杨和白羊草为研究对象,测定不同土层深度土壤抗剪强度和单根抗拉强度发现,根长密度和根表面积密度越大,根—土复合体抗剪强度越大,根径越小,单根抗拉强度越大,根系在剪切过程中越容易被拉断而充分发挥其抗拉强度。上述研究结果充分说明,根—土复合体抗剪强度受植物群落、根系特性和土壤性质的综合影响。

为了控制黄土高原强烈的水土流失,我国于 1999 年实施了大面积的“退耕还林(草)”工程,黄土高原大部分地区(88.2%)的植被得到显著恢复,草地面积显著增加^[12-13]。植被恢复势必引起土壤理化性质的改变^[14-15],同时植物群落结构、植物根系特性也发生变化^[16],这可能显著影响根—土复合体抗剪强度。因此,本文在黄土丘陵沟壑区典型小流域选择 6 个不同退耕年限的撂荒地和 1 个坡耕地,原位测定不同土层深度根—土复合体抗剪强度,旨在探究黄土丘陵沟壑区根—土复合体抗剪强度随退耕年限的变化规律,明确土壤理化性质和根系特性对其影响与机制。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 8—10 月在陕西省安塞区纸坊沟小流域(36°46′28″—36°46′42″N,109°13′46″—109°16′03″E)进行,该小流域地处暖温带半湿润气候向半干旱气候的过渡区域,年均降水量 549 mm,夏季多短历时暴雨,主要土壤类型为黄绵土^[17-18]。经野外踏查,在纸坊沟小流域选择退耕年限分别为 5,12,20,27,37,46 年的撂荒地和 1 个坡耕地为试验样地,并尽量保证样地坡度、坡向、土壤类型、退耕前土地利用方式等因素基本一致,不同退耕年限样地的基本信息见表 1。

表 1 不同退耕年限样地基本信息

样地名称	退耕年限/a	地理位置	坡度/%	高程/m	植被覆盖度/%	优势群落
SF	0	36°44′34″N,109°14′60″E	8.9	1208	60	玉米、大豆
AF5	5	36°45′00″N,109°14′45″E	15.5	1250	60	猪毛蒿
AF12	12	36°44′36″N,109°15′36″E	18.7	1183	65	芨芨、披针叶苔草
AF20	20	36°44′48″N,109°14′42″E	20.1	1262	55	铁杆蒿、长芒草
AF27	27	36°43′21″N,109°14′57″E	22.7	1341	80	铁杆蒿
AF37	37	36°45′10″N,109°15′13″E	20.7	1168	85	铁杆蒿、长芒草
AF46	46	36°45′46″N,109°15′60″E	16.8	1213	85	白羊草、铁杆蒿

注:SF 为坡耕地;AF 为退耕样地,其后数字为退耕年限。

1.2 剪切试验与数据处理

使用课题组自行设计原位剪切仪进行根—土复合体原位剪切试验,每个样地设 3 个重复,试验深

度分别为 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm,所用剪切盒尺寸为 25 cm×25 cm×15 cm。在选定的试验样地确定好具体的测试地点,为了减小剪

切盒安装过程对土壤可能产生的扰动,采用边切割剪切盒四周的土壤、边下按剪切盒的方式,缓慢地将剪切盒安装于待测土壤中,保证土壤表面与剪切盒内10 cm高度线齐平,然后用铁锹清理周边土壤,留出安放剪切仪的空间。剪切仪框架由左、右2条长度为1 m的不锈钢导轨和前、后2块长度为0.375 m的钢板底座组成。为避免试验时剪切仪晃动,影响剪切结果,采用2根铁钎将整个仪器框架锚固在待测剪切面上。通过固定在前底座上的电动推杆施加外力,推进速度约为0.7 mm/s,利用夹具和滑块连接剪切盒与导轨,保证剪切盒沿着导轨运动。采用轮辐式压力传感器(量程0~3 000 N,精度±1 N)和拉杆式位移传感器(量程0~200 mm,精度±0.1 mm)同步采集作用力和位移数据信号;用数据采集卡(采集频率100 Hz)将数据保存至笔记本电脑,使用制图软件绘制作用力—位移关系曲线。

在根—土复合体剪切破坏过程中,压力传感器测定的推力包括剪切力和摩擦力(图1a),其中剪切力主要包括根系发生断裂时的拉力、根系被拔出时与下层土壤间的摩擦力和土壤颗粒间的黏聚力,而摩擦力主要来自土体结构破坏后上、下剪切面之间和导轨与滑块之间的摩擦力。摩擦力与根—土复合体抗剪强度无关,需要将其从总的推力—位移曲线中剪去,得到实际的根—土复合体剪切力—位移曲线(图1a),为了提高各样地各土层剪切力—位移曲线的代表性,每个样地、每个土层都重复测定3次并求平均值(图1b)。试验时,在选定的样点安装固定好剪切仪,启动电动推杆施加推力,驱动剪切盒沿轨道缓慢运动20 cm,同步采集推力和位移数据信号,然后利用电动推杆将剪切盒拉回原位。为了防止剪切盒被

拉回时破坏剪切面,在拉回回剪切盒时将后底座调高少许,避免剪切盒与剪切面接触,待完全拉回剪切盒后,将后底座调回原位,二次以同样的速度推动剪切盒沿着轨道移动20 cm,记录作用力和位移数据信号,此时土壤已被剪切破坏,所得数据即为摩擦力和位移数据。从理论上讲,摩擦力与位移曲线是1条水平的直线,但实际上并非如此,呈缓慢上升趋势(图1a),造成这一结果的根本原因在于:虽然上下土体和主要根系经过第1次剪切后已被剪断,但土壤剪切面并不十分平整,加之根系的影响,剪切盒运动过程中会出现松散土壤颗粒单向堆积现象,从而轻微增大摩擦力,这种影响可能与土壤质地、根系特性及土壤含水量有关,需要后期逐渐加以修正,但整体而言,因摩擦力增加的幅度较小,并不会影响本试验的结果。

对于根—土复合体抗剪强度的指标,本文未使用土力学、材料力学中常用的单位面积最大剪切力,主要是因为根—土复合体剪切破坏过程是一个消耗能量的过程,需同时考虑剪切力和位移在根—土复合体在剪切破坏过程中的变化情况。因此,借鉴1999年Ekanayake等^[19]提出的能量法,通过对根—土复合体剪切力—位移关系曲线求取积分,得到消耗的能量(单位面积剪切做功),作为评价根—土复合体抗剪强度的指标。具体求取过程见图1c。找到剪切力—位移曲线上剪切力从快速增大到明显减小的转折点(X_P, T_P)(图1c),根据公式(1)计算得到根—土复合体抗剪强度:

$$E_p = \int_0^{X_P} F(x) dx \quad (1)$$

式中: E_p 为根—土复合体抗剪强度(J/m^2); $F(x)$ 为剪切力—位移关系曲线; x 为剪切位移(mm); X_P 为峰值剪切力对应的位移(mm)。

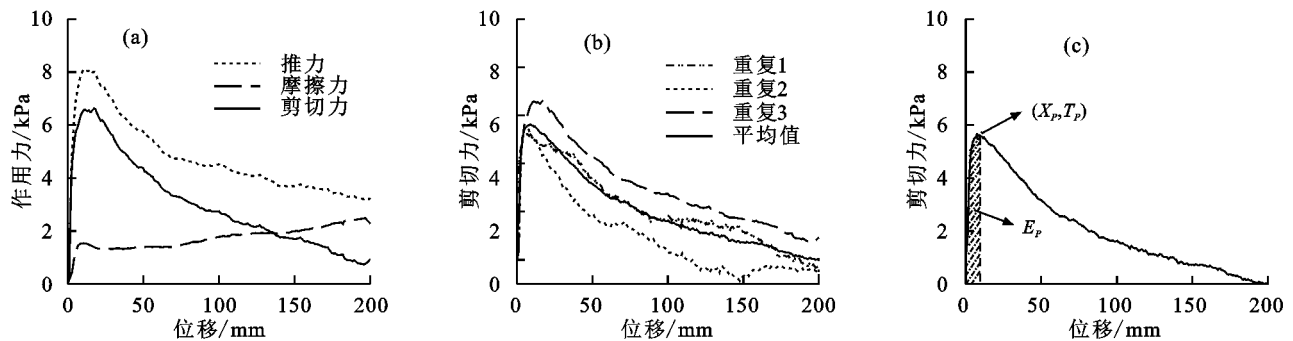


图1 根—土复合体抗剪强度求取过程

1.3 土壤和根系指标测定及数据分析

测定的土壤理化性质包括土壤含水量(SMC)、土壤容重(BD)、黏结力(Coh)、贯入阻力(PR)、有机质含量(SOM)、团聚体含量及其稳定性(MWD),根系特性指标包括有效根密度(R_d)、根长密度(RLD)和根质量密度(RMD)。土壤含水量、黏结力、贯入阻

力分别使用HH2型便携式TDR、Eijkelkamp便携式剪切力仪和便携式贯入阻力计测定,每个剪切面重复10次,每个样地不同土层深度重复30次。土壤容重采用环刀法测定,每个剪切面重复3次,每个样地各深度土层重复9次。有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定,团聚体稳定性使用改进后的

Yoder 法测定,用平均质量直径表示,每个样地各深度土层重复 3 次。有效根密度采用李勇等^[20]提出的 100 cm² 土壤横截面上直径 ≤ 1 mm 须根的个数表征,在剪切破坏面上随机选择 3 个 10 cm × 10 cm 的样方,数出直径 ≤ 1 mm 的须根个数并求平均值,每个样地各土层深度重复 3 次。每次剪切试验完成后,用直径 10 cm、高 5 cm 的环刀从剪切盒中随机取出 3 个含有根系的原状土样,装入已编号的自封袋中,带回室内,放置在 0.5 mm 筛子上冲洗、挑根;根系阴干后用直尺测量其长度并计算根长密度;然后将根系装入信封烘干(65 °C, 24 h),称重,计算根质量密度,每个样地各土层深度重复 9 次。

本文所用差异显著性检验、相关分析、回归分析、通径分析等数据处理过程均在 SPSS 26.0 软件中进行,使用 Origin 2018 软件进行制图。

1.4 土壤含水量标定处理

在野外条件下,土壤含水量时空变异强烈,而土壤含水量是影响根—土复合体抗剪强度的重要因素^[8]。为了消除土壤含水量对根—土复合体抗剪强度的影响,开展了根—土复合体抗剪强度土壤含水量标定试验。试验在 1 块面积约 70 m² 的裸地上进行,首先通过浇灌使裸地表层土壤饱和,然后随着时间的推移,进行 6 个土壤含水量(31.6%, 26.7%, 22.4%, 18.3%, 14.9%, 11.9%)条件下的原位剪切试验,每个土壤含水量条件下重复测定 3 次,计算并得到抗剪强度—土壤含水量标定曲线(图 2)。结果表明,随着土壤含水量增大,土体抗剪强度呈对数函数减小。为了消除试验时含水量对土壤抗剪强度的影响,统一将各退耕年限样地的土壤抗剪强度修订为含水量为 15% 时的抗剪强度,进一步分析退耕年限对根—土复合体的影响,修订公式(2)和(3)为:

$$E_c = -37.67 \ln(\text{SMC}) + 160.48 \quad (2)$$

$$E = E_{\text{前}} - (E_c(\text{SMC}) - E_c(15\%)) \quad (3)$$

式中: E_c 为裸土抗剪强度(J/m²); E 为标定后各退耕年限样地根—土复合体抗剪强度(J/m²); $E_{\text{前}}$ 为标定前各退耕年限样地根—土复合体抗剪强度(J/m²); SMC 为土壤含水量(%); $E_c(15\%)$ 为土壤含水量为 15% 时裸土抗剪强度(J/m²)。

2 结果与分析

2.1 根—土复合体剪切力—位移曲线

对不同退耕年限各土层 3 次重复求平均值后的剪切力—位移曲线见图 3。各条曲线大体均呈剪切力随剪切位移增加先快速增大随后逐渐减小的趋势,这些曲线与 Ekanayake 等^[19]提出的理想剪切力—位移曲线非常相似,但与 Ghestem 等^[21]通过原位直剪

试验获得的剪切力—位移曲线有所差异,引起这一差异的主要原因是其试验并未考虑剪切盒与剪切面间的摩擦力,因此剪切力达到峰值后下降速度较为缓慢,而本试验的剪切力—位移曲线是将推力减去摩擦力基础上获得的,故剪切力达到峰值后随位移增大而出现明显的下降趋势。不同土层深度、不同退耕年限样地的根—土复合体峰值剪切力变化为 3.7~9.6 kPa,略小于 Comino 等^[22]测得的高山草本植物根—土复合体最大剪切力(4.4~22.6 kPa),这一差异可能与其试验样地砾石含量多、土壤紧实以及土壤含水量、根系特性等条件与本试验差异所致。比较不同退耕年限样地的剪切力—位移曲线(图 3)发现,退耕年限为 12 年的样地各土层的峰值剪切力均小于其他样地,且与 0 年、20 年、27 年、37 年、46 年的峰值剪切力差异显著(表 2),但其剪切力达到峰值后下降的速度明显小于其他样地,分析原因可能与测定时土壤含水量显著大于其他样地有关(表 2),而土壤含水量增加使根土界面摩擦力减小,抵抗较强土壤剪切的能力下降,同时使土体更加黏滞,抵抗较大剪切位移的能力增加^[9]。进一步分析发现,各退耕年限样地峰值剪切力对应的位移与根系含量具有相同的变化趋势(图 3 和图 4),原因可能是在剪切破坏过程中,根系与土壤间产生相互错动现象,土壤所受剪应力通过摩擦力的形式转换为根的拉应力,而根系的弹性模量远大于土壤,因此根系的存在可以显著增加根—土复合体剪切破坏时的形变量^[3]。

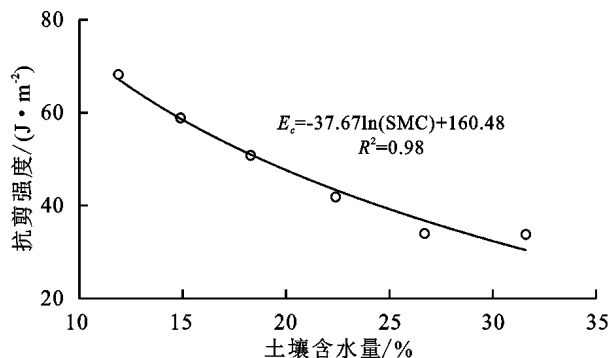


图 2 抗剪强度随土壤含水量变化曲线

2.2 抗剪强度随退耕年限的变化

采用公式(1)对图 3 中不同退耕年限各土层剪切力—位移关系曲线进行积分,得到根—土复合体抗剪强度,然后利用公式(2)和公式(3)修订为土壤含水量为 15% 时的抗剪强度,修订后的不同退耕年限各土层根—土复合体抗剪强度见图 5。总体来看,随着退耕年限增加,根—土复合体抗剪强度呈逐渐增大趋势,其中 0—20 cm 土层增加趋势最为明显,主要原因与根系的剖面分布特征密切相关。随着退耕年限增

大,0—20 cm 土层草本植物根系不断生长发育,根系与土壤之间的接触面积增加,摩擦力增大,根系固土作用逐渐增强^[8,11],导致 0—20 cm 土层抗剪强度随退耕年限呈明显的增加趋势。

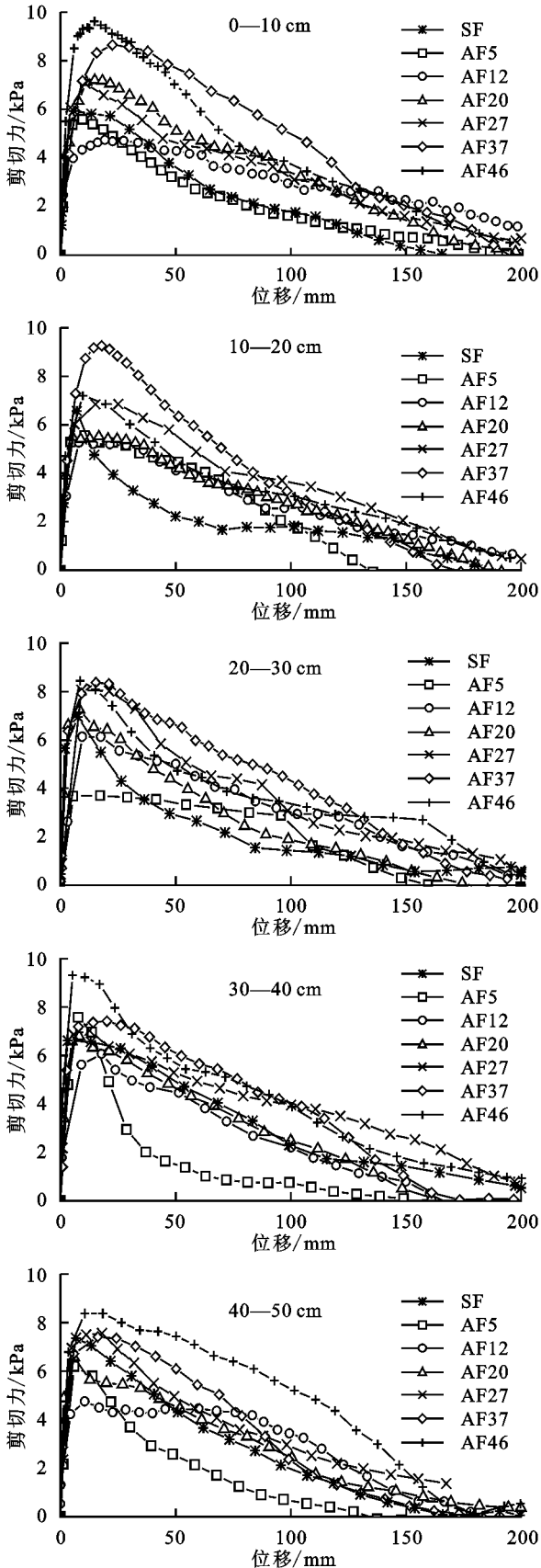
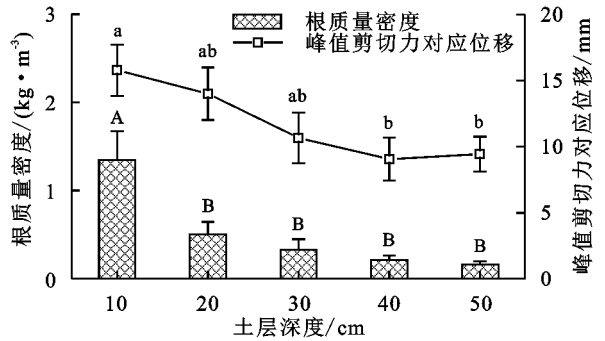


图 3 不同退耕年限各土层剪切力—位移关系曲线

表 2 不同退耕年限样地峰值剪切力及土壤含水量

样地	峰值剪切力/kPa	土壤含水量/%
SF	446.93±18.67cd	27.09±1.97b
AF5	392.84±24.46de	24.37±1.42bc
AF12	339.81±20.87e	36.64±1.68a
AF20	437.03±24.19cd	21.92±1.36c
AF27	469.39±15.41bc	15.55±0.17f
AF37	517.06±23.18ab	16.57±0.46ef
AF46	547.14±27.00a	19.73±0.28d

注:不同字母表示不同样地间差异显著($P < 0.05$)。



注:不同大写字母表示不同土层深度根质量密度差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示不同土层深度峰值剪切力对应位移差异显著($P < 0.05$)。

图 4 根质量密度和峰值剪切力对应位移随土层深度的变化

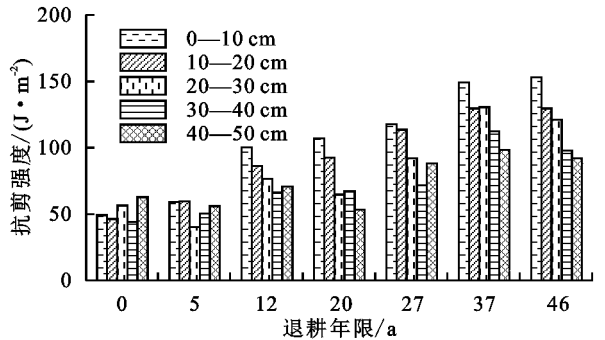


图 5 不同退耕年限各土层根—土复合体抗剪强度

随着土层深度增大,退耕样地根—土复合体抗剪强度逐渐减小,而坡耕地抗剪强度随土层深度的增大而增大,这一结果与 Mickovski 等^[23]的试验结果类似。对于退耕地,随着土层加深,植物根系密度显著减小^[24],根—土复合体抗剪强度随土层深度增大而减小的结果说明,与土壤性质(如土壤容重)相比,根系对根—土复合体抗剪强度的影响占主导。而对于坡耕地,受农事活动的影响,根系密度较小,因而根系对根—土复合体抗剪强度的影响可以忽略。同时因其深层土壤未受耕作扰动,结构紧密,因而土壤抗剪强度较耕层更大。具体来看,0—10 cm 土层坡耕地的抗剪强度为 49.22 J/m²,退耕 5 年、12 年、20 年、27 年、37 年和 46 年的样地,其抗剪强度依次为 59.06, 100.42, 107.10, 117.81, 149.21, 153.03 J/m²,与坡耕地相比,增幅依次为 20.0%, 104.0%, 117.6%, 139.4%, 203.2% 和 210.9%;而对于 10—20, 20—30, 30—40,

40—50 cm 土层,坡耕地抗剪强度依次为 46.31,56.54,44.15,62.78 J/m²,与坡耕地抗剪强度相比,其他退耕样地抗剪强度增幅依次为 29.1%~180.1%, -28.9%~130.9%,14.5%~154.5%和 -14.9%~56.5%;对于退耕 46 年的样地,其抗剪强度由表层至底层依次为 153.03,129.69,121.23,97.81,92.02 J/m²,与表层相比,下层根—土复合体抗剪强度增幅依次为 -15.3%, -20.8%, -36.1%和 -39.9%。

进一步对不同退耕年限样地 0—50 cm 土层抗剪强度进行分析,其描述性统计见表 3。最小值变化范围为 40.18~98.28 J/m²,最大值变化范围为 59.76~153.03 J/m²,均值的变化范围为 51.80~124.01 J/m²;与坡耕地相比,退耕 5 年、12 年、20 年、27 年、37 年和 46 年样地的抗剪强度均值依次增加 2.5%,54.6%,48.7%,86.5%,139.4%和 129.3%。变异系数表示样本标准差对均值的百分数,在某种程度上可以反映样本的变异程度,土壤科学中变异系数在 0~15%为弱变异,16%~35%为中等变异,>36%为强变异^[25],则坡耕地和退耕 5 年样地 0—50 cm 土层抗剪强度均为 15%,属弱变异。其余退耕样地变异系数依次为 17%,29%,20%,16%和 21%,属中等变异。

表 3 不同退耕年限样地 0—50 cm 土层抗剪强度描述统计

样地	最小值/ (J·m ⁻²)	最大值/ (J·m ⁻²)	均值/ (J·m ⁻²)	标准差/ (J·m ⁻²)	变异 系数/%
SF	44.15	62.78	51.80	7.72	15
AF5	40.18	59.76	53.09	8.08	15
AF12	66.10	100.42	80.06	13.65	17
AF20	53.45	107.10	77.03	22.10	29
AF27	71.64	117.81	96.61	19.09	20
AF37	98.28	149.21	124.01	19.41	16
AF46	92.02	153.03	118.75	24.77	21

对各土层抗剪强度均值进行 Logistic 回归分析发现,0—50 cm 土层根—土复合体抗剪强度随退耕年限增加呈现“S”形增加趋势(图 6),在植被恢复初期(0~5 年),根—土复合体抗剪强度呈缓慢增加趋势,中期(5~27 年)呈快速增加趋势,27 年之后增加趋势逐渐变缓,约 37 年以后趋于相对平稳。分析原因可能是植被恢复初期,植被根系稀疏,根系与土壤间接触面积较小,根系加筋效应较小^[22]。随着植被的持续恢复,根系长度和直径增大,细根数量增加,根系分泌物增多,土壤结构得到改善,根系和土壤逐渐结合形成复合体,一方面土壤所受剪应力更多的转化为根系拉应力^[11],另一方面植物消耗土壤水分,增加土壤基质吸力^[8],因此根—土复合体抗剪强度明显增大。但当植被恢复到一定年限后,土壤中植物粗根系明显增多,其在根—土复合体剪切过程中更容易滑出而不是断裂^[23],根

系抗拉力只能部分发挥,故根—土复合体抗拉强度增加缓慢并趋于平稳。随退耕年限增加,0—50 cm 土层根—土复合体抗剪强度的变化符合公式(4)。

$$E_m = 152.73 - \frac{2.93 \times 10^4}{t^{1.718} + 286.51} \quad R^2 = 0.95 \quad (4)$$

式中: E_m 为 0—50 cm 土层根—土复合体抗剪强度的平均值(J/m²); t 为退耕年限(年)。

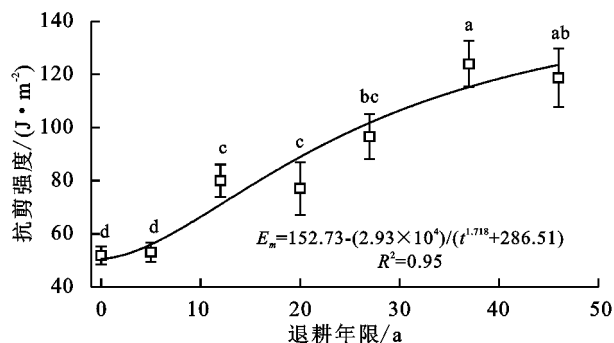


图 6 0—50 cm 土层抗剪强度平均值随退耕年限的变化

2.3 根—土复合体抗剪强度的影响因素

植被恢复过程中,根系特性和土壤理化性质都会发生明显变化,二者相互作用、相互影响。一方面土壤水分时空分布、养分(氮、磷、钾等)含量、紧实度、孔隙度等理化性质会影响根系的生长过程;另一方面,植物根系穿插、挤压土壤增加土壤非毛管孔隙,提高土壤入渗性能,同时根系分泌物、枯落物和根系死亡分解等均增加土壤有机质,促进土壤团聚体和微团聚体形成和发育,提升土壤抗剪强度^[14]。对根—土复合体抗剪强度、根系特性和土壤理化性质进行 Pearson 线性相关分析(表 4)发现,根—土复合体抗剪强度与根系特性、有机质含量和团聚体稳定性呈极显著正相关($P < 0.01$),但与土壤容重和贯入阻力呈极显著负相关($P < 0.01$),与土壤黏结力相关性不显著,说明根—土复合体抗剪强度受土壤理化性质和根系特性共同影响,而土壤容重和贯入阻力与根系特性、有机质含量、团聚体稳定性呈极显著负相关($P < 0.01$),因此,它们对根—土复合体抗剪强度的影响未得到准确体现;土壤容重与抗剪强度间的负相关,与根系对抗剪强度的影响更强大有关,前文已分析,这里不再赘述。土壤黏结力表征土壤抵抗横向剪切的能力,但在本试验中,土壤黏结力与根—土复合体抗剪强度关系不显著,可能是因为黏结力测试深度仅为 5 mm,测试面积仅约 0.002 5 m²,无法测得根系对黏结力的影响。

对根—土复合体抗剪强度与土壤理化性质和根系特性进行简单回归分析(图 7)发现,根—土复合体抗剪强度与有机质含量、根长密度和根质量密度呈对数正相关关系,决定系数 R^2 分别为 0.32,0.69 和 0.78(图 7a、图 8b、图 8c);与团聚体稳定性和有效根密度

呈线性正相关关系,决定系数 R^2 分别为 0.70 和 0.66 (图 7b、图 8a)。对根—土复合体抗剪强度与土壤理化性质和根系特性进行逐步多元线性回归表明,团聚体稳定性、根质量密度和有机质含量是影响根—土复合体抗剪强度的主要因素。进一步进行通径分析发现,团聚体稳定性、根质量密度、有机质含量的直接通径系数分别为 0.570, 0.835, -0.521(表 5),即根质量密度对根—土复合体抗剪强度的直接正向作用最大,根系密度越多,土壤被剪切破坏时摩擦阻力越大,消耗能量更多^[26]。团聚体稳定性亦直接正向影响根—土复合体抗剪强度,即土壤颗粒团聚程度越高,土壤颗粒之间的凝聚力越大,土壤被剪切破坏时需要更多能量;而有机质含量却直接反向作用于根—土复合体抗剪强度,这可能与有机质含量越高土体越松散、根土间挤压作用减弱,根系不能通过摩擦力将其拉应力有效消散在土壤颗粒之间有关^[23]。

团聚体稳定性、根质量密度、有机质含量的间接通径系数分别是 0.269, -0.031 和 1.103,说明团聚体稳定性间接正向作用于根—土复合体抗剪强度,主要原因是团聚体发育会改善土壤通气性和透水性,促进根系生长发育,进而增加根—土复合体的抗剪强度;而根质量密度间接反向作用于根—土复合体抗剪强度,主要是因为死亡根系的分解能够增加土壤有机质含量,导致土壤疏松多孔,抗剪强度减小;有机质含量通过团聚体稳定性和根质量密度均间接正向作用于根—土复合体抗剪强度,即有机质含量增加有利于团聚体的发育和根系的生长,进而提高根—土复合体抗剪强度。团聚体稳定性、根质量密度和有机质含量的直接和间接通径系数之和分别是 0.839, 0.804 和 0.582,说明随着团聚体稳定性、根质量密度和有机质含量增大,根—土复合体抗剪强度增大。

表 4 抗剪强度与根系特性和土壤理化性质间的相关系数

项目	BD	Coh	PR	R_d	RLD	RMD	SOM	MWD
E	-0.583**	-0.158	-0.531**	0.812**	0.795**	0.804**	0.582**	0.839**
BD		0.286	0.506**	-0.750**	-0.690**	-0.562**	-0.632**	-0.617**
Coh			0.518**	-0.427*	-0.227	-0.269	-0.234	-0.272
PR				-0.633**	-0.496**	-0.491**	-0.510**	-0.555**
R_d					0.927**	0.888**	0.802**	0.844**
RLD						0.941**	0.842**	0.776**
RMD							0.867**	0.738**
SOM								0.665**

注: E 为单位面积剪切做功; BD 为土壤容重; Coh 为土壤黏结力; PR 为贯入阻力; R_d 为有效根密度; RLD 为根长密度; RMD 为根质量密度; SOM 为有机质含量; MWD 为团聚体稳定性(平均质量直径);**表示在 0.01 水平显著相关;*表示在 0.05 水平显著相关。

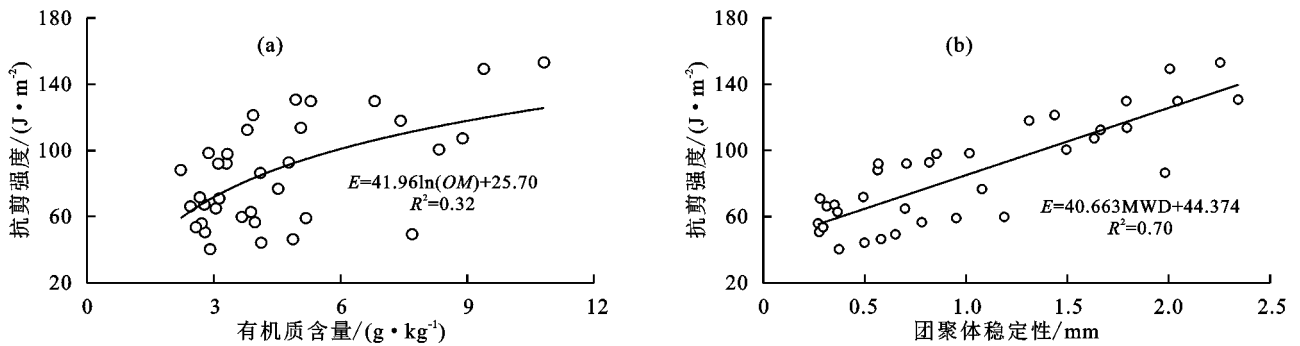


图 7 土壤理化性质与抗剪强度的关系

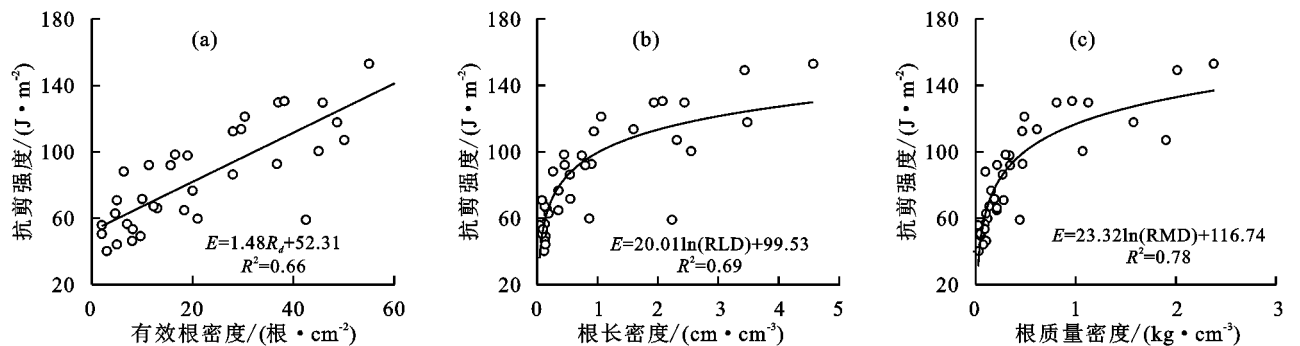


图 8 根系特性与抗剪强度的关系

表 5 根—土复合体抗剪强度主要影响因子的通径分析

影响因子	直接通径系数	间接通径系数				通径系数之和
		团聚体稳定性	根质量密度	有机质含量	求和	
团聚体稳定性	0.570	—	0.616	-0.347	0.269	0.839
根质量密度	0.835	0.421	—	-0.452	-0.031	0.804
有机质含量	-0.521	0.379	0.724	—	1.103	0.582

3 结论

(1) 随退耕年限增大, 根—土复合体抗剪强度增大, 0—50 cm 土层抗剪强度均值从 50 J/m² 左右增加至约 120 J/m²; 与坡耕地相比, 退耕 5 年、12 年、20 年、27 年、37 年和 46 年样地的增幅依次为 2.5%、54.6%、48.7%、86.5%、139.4% 和 129.3%, 呈典型的“S”形增加趋势; (2) 随着土层深度增加, 植物根系密度显著减少, 根—土复合体抗剪强度呈逐渐下降趋势, 而坡耕地则因根系密度较少, 深层土壤结构紧密, 抗剪强度随土层深度呈增加趋势; (3) 根—土复合体抗剪强度受根系特性和土壤理化性质的显著影响, 与有机质含量、根长密度和根质量密度呈对数正相关关系, 与团聚体稳定性和有效根密度呈线性正相关关系, 决定系数 R^2 分别为 0.32、0.69、0.78、0.70 和 0.66; (4) 逐步多元线性回归和通径分析结果表明, 团聚体稳定性、根质量密度和有机质含量是影响根—土复合体抗剪强度的关键因素, 通径系数分别为 0.839、0.804 和 0.582; 根质量密度对根—土复合体抗剪强度的直接正向作用最大(0.835), 而有机质主要通过影响根系生长和团聚体稳定性间接影响根—土复合体抗剪强度(1.103)。研究结果对于揭示根—土复合体稳定性动态变化及其动力机制具有重要意义。

参考文献:

- [1] 胡夏嵩, 李国荣, 朱海丽, 等. 寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 613-620.
- [2] Badhon F F, Islam M S, Al-Hussaini T M. Study of root-reinforcement effect on shear strength parameters of soil obtained by direct shear tests[C]//Proceedings, International Conference on Disaster Risk Mitigation, Dhaka, Bangladesh, 2019.
- [3] Comino E, Druetta A. In situ shear tests of soil samples with grass roots in Alpine environment[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2009, 5(4): 475-486.
- [4] Tan H M, Chen F M, Chen J, et al. Direct shear tests of shear strength of soils reinforced by geomats and plant roots[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(6): 780-791.
- [5] Giadrossich F, Schwarz M, Cohen D, et al. Methods to measure the mechanical behaviour of tree roots: A review[J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 256-271.
- [6] Fan C, Tsai M. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 1-15.
- [7] 陈丽华, 余新晓, 宋维峰, 等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] Yildiz A, Graf F, Rickli C, et al. Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus[J]. Catena, 2018, 166: 98-113.
- [9] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 157-166.
- [10] Comino E, Druetta A. In situ shear tests of soil samples with grass roots in Alpine environment[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2009, 5(4): 475-486.
- [11] 王月, 杜峰, 周敏, 等. 陕北林草混交根土复合体抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 213-219.
- [12] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 等. 黄土高原植被恢复成效及影响因素研究[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8593-8605.
- [13] Li J J, Li Z, Lü Z M. Analysis of spatiotemporal variations in land use on the Loess Plateau of China during 1986—2010[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(11): 997-1009.
- [14] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 143-154.
- [15] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment[J]. Catena, 2018, 166: 192-199.
- [16] 师阳阳, 陈云明, 张光辉, 王兵. 不同退耕年限撂荒地植物多样性及生物量分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 36-40, 44.
- [17] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Variation in soil erosion resistance of slips deposition zone with progressive vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(1): 234-248.
- [18] 杨寒月, 张光辉, 张宝军. 黄土丘陵沟壑区沟坡典型植物群落生长特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 62-67.
- [19] Ekanayake J C, Phillips C J. A method for stability analysis of vegetated hillslopes: An energy approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1172-1184.
- [20] 李勇, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报, 1991(12): 935-938.

- 水土流失防治与生态安全[M].东北黑土卷.北京:科学出版社,2010:52-55.
- [3] 阎百兴,汤洁.黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J].地理研究,2005,24(4):499-506.
- [4] 刘兴土,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.
- [5] 马强,宇万太,赵少华,等.黑土农田土壤肥力质量综合评价[J].应用生态学报,2004,15(10):1916-1920.
- [6] 赵其国,骆永明.论我国土壤保护宏观战略[J].中国科学院院刊,2015,30(4):452-458.
- [7] 牛晓音,王延华,杨浩,等.滇池双龙流域不同土地利用方式下土壤侵蚀与土壤养分分异[J].环境科学研究,2014,27(9):1043-1050.
- [8] 张明礼,杨浩,邹军,等.北方土石山区土壤侵蚀对土壤质量的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):218-221.
- [9] 郑粉莉,张锋,王彬.近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价[J].应用生态学报,2010,30(22):6044-6051.
- [10] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区¹³⁷Cs 示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):62-67.
- [11] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,等.间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):54-60.
- [12] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
- [13] 王彬,郑粉莉,王玉玺.东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析[J].农业工程学报,2012,28(6):126-131.
- [14] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,等.地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J].土壤学报,2016,53(3):572-581.
- [15] 方华军,杨学明,张晓平,等.¹³⁷Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J].生态学报,2005,25(6):1376-1382.
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [17] 李勇,耿肖臣.样品厚度对实验室无源效率刻度技术测定¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 的影响[J].原子能科学技术,2010,44(1):80-83.
- [18] 张信宝,文安邦,奎因 TA,等.黄土崩坡农地侵蚀与坡长的关系[J].中国水土保持,1998(1):3-5.
- [19] 黑龙江省土地管理局,黑龙江省土壤普查办公室.黑龙江土壤[M].北京:中国农业出版社,1992:501-526.
- [20] 全国土壤普查办公室.中国土种志 [M].2 卷.北京:中国农业出版社,1995.
- [21] 冯志珍.东北薄层黑土区土壤侵蚀—沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [22] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008:3-8.
- [23] Papiemik S K, Lindstrom M J, Schumacher J A, et al. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape[J].Journal of Soil and Water Conservation,2005,60(6):388-395.
- [24] Zheng F L, He X B, Gao X T, et al. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2005,108(1):85-97.
- [25] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China[J].Soil and Tillage Research,2016,161:79-85.
- [26] 郭二辉,方晓,马丽,等.河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响:以温榆河为例[J].生态学报,2020,40(11):3785-3794.
- [27] 张少良,马泉来,周军,等.东北黑土区小流域“林—旱—水”格局土壤磷空间分布特征研究[J].水利学报,2016,47(10):1227-1236.
- [28] 安娟,郑粉莉,李桂芳,等.不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响[J].生态学报,2011,31(24):7579-7590.
- [29] 陈碧华,孙丽,李新峥,等.新乡市大棚菜田土壤养分及盐分的演变[J].农业工程学报,2013,29(15):83-90.

(上接第 48 页)

- [21] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J].Plant and Soil,2014,377(1/2):43-61.
- [22] Comino E, Druetta A. The effect of *Poaceae* roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment [J].Soil and Tillage Research,2010,106(2):194-201.
- [23] Mickovski S B, Hallett P D, Bransby M F, et al. Mechanical reinforcement of soil by willow roots: Impacts of root properties and root failure mechanism[J].Soil Science Society of America Journal,2009,73(4):1276-1285.
- [24] 赵丽兵,张宝贵,苏志珠.草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究[J].中国生态农业学报,2008,16(3):718-722.
- [25] 管孝艳,王少丽,高占义,等.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J].生态学报,2012,32(4):198-206.
- [26] Gonzalez-Ollauri A, Mickovski S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes[J].Geoderma,2017,285:141-150.