doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.036

草地切根下根土复合体本构关系研究

张学宁 王德成 尤 泳 金 峤 赵彦瑞
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为降低切根作业过程中的阻力,对不同盖度草地复合体的坚实度、容重、含水率、孔隙度、含根量、根系直径等物理特征及根系分布特征进行了数学统计分析;通过草地原状土及重塑土的三轴试验,对不同退化程度的草地复合体的本构关系进行了研究,并利用ABAQUS仿真软件验证了不同退化程度草地复合体的本构关系。结果表明,不同盖度草地复合体的物理特征及根系分布特征差异较大,盖度为30% ~50%的退化草地物理状况最好;草地原状土试样的黏聚力、抗剪强度、弹性模量及割线模量均随草地退化程度的加剧而减小,切根刀对草地的剪切强度应大于243.03 kPa;仿真三轴试验与实际三轴试验所得偏应力极限值的相对误差均小于8%,所确定的本构参数可直接应用于草地土壤的数值建模。研究可为草地切根作业及切根刀的优化设计提供理论依据。

关键词: 土壤-根系复合体; 草地切根; 本构关系; 三轴试验; ABAQUS; 数值模拟

中图分类号: S151⁺.3; S282 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-1298(2022)07-0337-10 **OSID**:

Constitutive Relationship of Soil - Root Composite Based on Root-cutting of Grassland

ZHANG Xuening WANG Decheng YOU Yong JIN Qiao ZHAO Yanrui
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: With the aim to reduce the resistance during root-cutting operation, the physical properties and root distribution characteristics of grasslands with different degradation degrees were analyzed by measuring the soil firmness, bulk density, water content, porosity, root content, and root diameter. The constitutive relationship of the grassland soil - root composite was studied through triaxial tests of the undisturbed soil of the grassland and the remolded soil. The constitutive relationship of grassland soil with different degradation degrees was verified by numerical simulation. It was found that the physical characteristics and root distribution characteristics of grasslands with different degradation degrees were quite different, and the physical condition of degraded grassland with coverage of 30% ~50% was the best. The cohesion, shear strength, elastic modulus, and secant modulus of undisturbed grassland soil samples were decreased with the aggravation of grassland degradation, and the shear strength of root-cutters on grassland should be greater than 243.03 kPa. The relative error of the deviator stress limit value obtained by the simulated triaxial test and the actual triaxial test was less than 8%, and the triaxial test of grassland soil simulated by ABAQUS was reliable. The constitutive parameters can be directly applied to the numerical modeling of grassland soil. The research can provide a theoretical basis for grassland root-cutting operation and the optimal design of root cutter.

Key words: soil - root composite; root-cutting of grassland; constitutive relationship; triaxial experiment; ABAQUS; numerical simulation

0 引言

多年生根茎型牧草根系发达、密集,易与土壤交织形成土壤-根系复合体,其严重影响了草地土层通透性[1-3]。通过切根作业破除草地土壤-根系复合体结构、为牧草生长提供适宜的土壤环境是退化草

收稿日期: 2021-07-28 修回日期: 2021-09-27

基金项目: 财政部和农业农村部:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-34)

作者简介: 张学宁(1997—),男,博士生,主要从事草地改良机械研究,E-mail: 2517551245@qq.com

通信作者: 王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事牧草机械化研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

地改良的主要方式之一,为此,需要设计性能优良的切根机械[4]。在我国退化草地中,轻度、中度、重度退化草地分别占比53.8%、32.6%、13.6%[5],而不同退化程度草地所适用的切根作业要求也有所差异。研究不同退化程度草地根系分布特征、物理力学特征的演变规律对于降低切根机具功率损耗、提高草地切根作业质量和效率等具有重要意义。

草地土壤-根系复合体的物理力学特性不同于农田土壤[6],相应的本构关系也较为复杂,土体的失效或剪切强度与其边界本构条件有密切关系[7],本构关系通常用土体的应力-应变关系表示。草地土壤-根系复合体可看作是筋材种类为草地根系的加筋土,众多学者通过剪切试验或三轴试验研究分析了加筋土体的强度特性及其影响因素[8-12]。王元战等[13]通过室内三轴试验分析了含根量对原状与重塑草根加筋土的强度影响,并通过含根量对二者强度关系进行了量化。含根量的增加能够有效提高土体粘聚力,但对内摩擦角的影响不大[14];而对于重塑根系加筋土,存在最优含根量使其强度最高[15]。但由于三轴试验的取样制样难度大、操作复杂、试验时间长等的限制,数值模拟手段开始逐渐应用到三轴试验中[16-17]。宁雷[18]通过ABAQUS仿真软件对土体的应力-应变关系和结构性特点进行了验证。同时,通过仿真三轴试验获取准确的本构模型参数也可为草地土壤的数值建模提供依据[19]。

本文以草地土壤-根系复合体为研究对象,对不同盖度下退化草地复合体的根系分布特征、物理特征及本构特征进行比较分析,在此基础上通过三轴试验探究根系分布特征对复合体本构特征的影响,并通过ABAQUS仿真软件进行三轴试验的数值模拟,为指导草地切根作业、切根刀具的优化设计及草地土壤的数值建模等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 取样地概况

试验取样地点位于国家牧草产业技术体系张家口综合实验站内(115°41′E,41°45′N,海拔1 400 m)的天然草地,站内地带性植被类型为"羊草+克式针茅+杂草类",该地年均气温1.4℃,大于10℃的年积温为1 513.1℃,无霜期约110 d,年均降水量350 mm左右,且降雨期多集中于夏季[20]。取样草地主要植被类型为羊草,生长时间为5年以上。羊草草地土壤-根系复合体如图1所示。

1.1.2 草地物理特征及根系分布特征测定

采用样线结合样方的方法进行草地参数测定,

图1 退化草地土壤-根系复合体

Fig. 1 Soil - root composite of degenerated grassland

在每个样地选择100 m×100 m区域进行取样,选择其对角线为样线,在样线上平均设置5个1 m×1 m的样方,在样方内进行草地盖度测定[21-22],选取草地退化后的不同盖度(0~30%、30%~50%、50%~70%、70%~100%)作为取样地并在相同样方内测定其他参数。使用TJSD-750型土壤紧实度仪测定草地坚实度,用环刀法和干燥法对各取样点附近的草地容重、含水率、孔隙度进行测定[23-25]。草地根系分布特征参数包括:根系聚集深度、根系直径、含根量。使用钢卷尺测定草地根系的聚集深度,以90%根系的分布深度作为相应盖度下草地根系的聚集深度;测量根系直径时,采用根系两端和中间三者的平均值作为测定值[15];使用称量法测量各盖度草地的含根量。取5个样方的平均值作为各草地参数的测定值。

1.1.3 草地原状土取样及重塑土制样

于2021年5月30日进行取样作业,采用定制环刀进行草地原状土取样,原状土为直径61.8 mm、高125 mm的圆柱体试样,原状土取样后立即用保鲜膜将环刀整体包裹密封,防止水分散失[26],原状土试样如图2所示。

图2 原状土试样

Fig. 2 Undisturbed soil sample

为进一步探究并验证草地土壤-根系复合体强度与根系特征的关系,进行重塑土试样的三轴试验。在取样点附近挖取足量草地土样,装入自封口塑料袋带回室内,将根系挑出洗净后置于恒温恒湿箱中

备用[14]。将剩余土壤放入恒温为 110℃ 的干燥箱中干燥，取出冷却后将土壤碾碎，过 2 mm 土壤筛，使用过筛后的土壤进行重塑土样制备。按照原状土的容重和含水率计算得出重塑土样所需干土质量和加水量，将水均匀喷洒在土料表面，拌匀后置于密封容器中静置 12 h 以上，使土样含水率均匀。将根系加入到土样中，充分拌合使根系在土样中均匀分布[13]，采用压样法进行重塑土试样的制备[27]，重塑土试样和原状土试样尺寸保持一致，重塑土试样如图 3 所示。

图 3　重塑土试样

Fig. 3　Remolded soil sample

1.2　试验仪器及试验方法

试验仪器为南京土壤仪器厂生产的 TSZ－3A 型全自动应变控制式三轴仪，如图 4 所示。相同盖度条件下所取土样做一组三轴试验，共 4 组试验，每组 3 个试样，试验土样为原状土（原状土取样时，各盖度应多取 2～3 个，防止试验失败无法获取数据）。对每组 3 个土样分别施加围压 100、200、300 kPa，加载速率为 2 mm/min，剪切至轴向应变为 18% 时结束，试验采用不固结不排水（UU）的方式加载[8,28-30]，数据由计算机自动采集。

1.3　数据处理与分析

通过 Excel 2019 和 SPSS 25.0 对试验数据进行处理和分析，并用 Excel 2019 绘图。

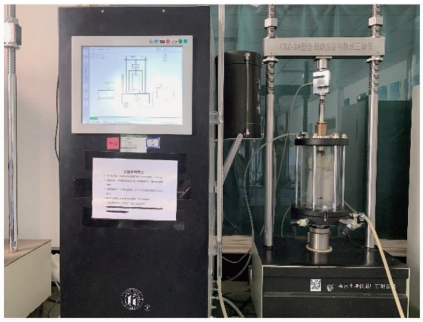


图 4　TSZ－3A 型全自动应变控制式三轴仪

Fig. 4　TSZ－3A automatic strain control triaxial apparatus

2　试验结果与分析

2.1　退化草地物理特征及根系分布特征

不同盖度下退化草地的各参数统计结果如表 1 所示。随着草地盖度的增加，草地表层的含根量也逐渐增多。容重反映土壤松紧程度[31]，过高的容重会限制作物根系生长[32]，相比盖度为 0～30% 的退化草地，盖度为 30%～50%、50%～70% 和 70%～100% 的退化草地的容重均有所减小，而孔隙度却均有所增加，这是因为根系的存在能够降低土壤容重，增加非毛管孔隙度，进而增强土壤疏松性[33]。这也表明，含根量的增加会缓解草地表层的板结状况，但这种缓解趋势并不呈正相关的关系。以该退化羊草草地为例，当含根量为 4.376 mg/cm^3（盖度为 0～30%）时，草地板结情况最为严重（容重最大，孔隙度最低）；当含根量增加到 8.058 mg/cm^3（盖度为 30%～50%）时，草地板结情况最为乐观（容重最小，孔隙度最高）；随着含根量的继续增加，草地板结情况却出现加剧迹象，草地土壤容重变大、孔隙度减小，但草地板结加剧状况并未达到草地含根量最低（盖度为 0～30%）时的程度。

表 1　不同盖度下草地物理参数统计结果

Tab. 1　Statistical characteristics of grassland physical parameters under different coverages

参数	盖度/%			
	0～30	30～50	50～70	70～100
含根量/(mg·cm^{-3})	(4.376 ± 1.826)^c	(8.058 ± 1.395)^b	(12.033 ± 1.234)^a	(15.155 ± 1.474)^a
坚实度/MPa	(2.688 ± 0.441)^c	(3.247 ± 0.464)^{bc}	(3.671 ± 0.544)^{ab}	(4.284 ± 0.305)^a
容重/(g·cm^{-3})	(1.493 ± 0.033)^a	(1.147 ± 0.072)^b	(1.249 ± 0.025)^b	(1.240 ± 0.042)^b
含水率/%	(4.888 ± 0.002)^b	(5.688 ± 0.005)^a	(4.378 ± 0.002)^{bc}	(4.158 ± 0.002)^c
孔隙度/%	(43.651 ± 1.247)^b	(56.717 ± 2.724)^a	(52.871 ± 1.577)^a	(53.191 ± 0.937)^a
根系聚集深度/cm	(5.975 ± 0.444)^d	(9.325 ± 0.549)^c	(12.650 ± 0.585)^b	(16.450 ± 0.618)^a

注：采用 Duncan 比较法进行多重比较，同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著（P＜0.05）。

草地坚实度随退化程度加剧（盖度减小）呈现逐渐减小趋势，当草地盖度为 70%～100%（含根量为 15.155 mg/cm^3）时，羊草丰富的地下根系和土壤相互交织形成土壤-根系复合体结构，使草地土壤变

得更加紧实,其坚实度达到 4.284 MPa。当草地盖度为 50% ~70% 时,含根量有所降低,其土壤-根系复合体的结合有效程度下降,草地坚实度也随之下降。当草地盖度为 30% ~50% 时,含根量继续降低,根系使土体中的潜在裂隙增加,根系对草地土壤的疏松作用开始显现,草地坚实度持续下降。而当草地盖度为 0~30% 时,含根量最低,大部分地下根系无法与土壤形成有效的土壤-根系复合体结构;与之相反,根系的存在使得草地表层变得疏松,草地坚实度大幅降低。

草地容重随盖度的增加呈现先减小后增大再减小的趋势,草地含水率和孔隙度随盖度的增加呈现先增大后减小的趋势,且转折点均出现在盖度为 30% ~50% 的退化草地。该区域退化草地的物理参数统计结果表明,盖度为 30% ~50% 的退化草地土壤状况较好,其容重最小,含水率和孔隙度最高;对于该区域退化草地来说,存在最适宜的盖度使草地物理状况保持在相对较好的水平。

由显著性分析可知,各盖度草地根系分布特征的差异主要表现为含根量和根系聚集深度的不同。随着草地退化程度的加剧,含根量逐渐减少并且根系聚集深度明显呈现出由深变浅的趋势。在进行草地切根作业时,应根据根系聚集深度的变化对切根机械的切根深度做出调整。根据所测定的根系聚集深度,盖度为 0 ~30% 、30% ~50% 、50% ~70% 和 70% ~100% 草地的切根深度应在 6.0、9.3、12.7、16.5 cm 左右。为统一切根作业标准,并兼顾切根机械效率和切根作业效果,将盖度为 70% ~100% 草地的切根深度定为 16 cm;而每当草地盖度减小 20% 左右时,切根深度应减小 3 cm;当草地盖度减小至 10% 左右时,切根作业深度应定为 7 cm。同时,为提高切根机械的适应性,切根机械的切根深度应在 7 ~16 cm 范围内可调。该取样草地根系直径主要分布在 0.12 ~1.37 mm 范围内,且不同盖度草地所得到的根系直径阈值范围极为接近,根系直径统计数据的阈值范围相对较广,故不进行平均值计算及显著性分析。

2.2 退化草地强度特征

2.2.1 草地原状土应力-应变特征

同一围压下各盖度草地原状土试样的应力-应变曲线如图 5 所示,σ_1 为轴向破坏应力;σ_3 为围压,$\sigma_1 - \sigma_3$ 为主应力差,即偏应力;ε 为轴向应变。各试验条件下的应力-应变曲线均呈现应变硬化现象,即应力随应变的增加而增加,但增加速率逐渐降低,且无明显峰值出现。当轴向应变较小时(小于 5%),应力-应变曲线近似呈线性关系,可认为土体处于完全弹性变形状态;当轴向应变继续增加,应力-应变曲线逐渐趋于平缓,偏应力增大并逼近一极限值。

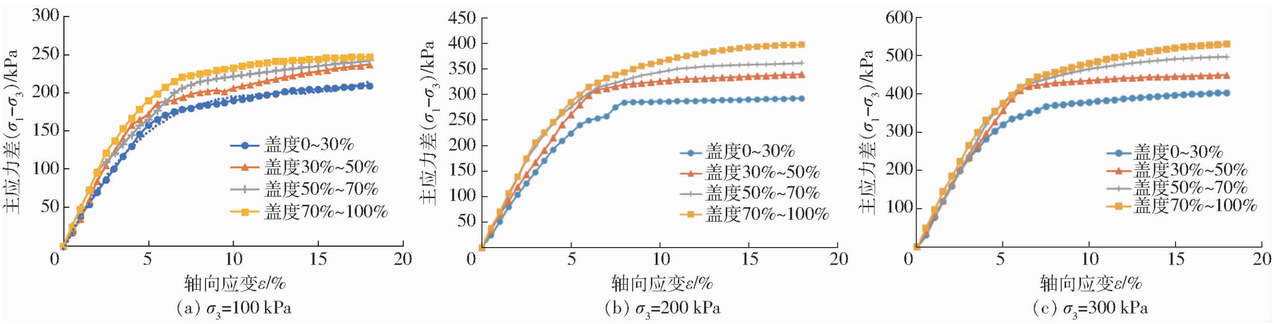


图 5 原状土试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress - strain curves of undisturbed soil samples

因各应力-应变曲线无明显峰值,故选取轴向应变为 15% 时对应的偏应力作为试样的抗剪强度进行分析[7]。不同围压与含根量工况下草地原状土试样的抗剪强度如图 6 所示。在同一围压下,随着含根量(草地盖度)的增加,草地原状土试样的抗剪强度也有所增加,这与草地原状土试样中含根量的增加有关,草地根系的存在使得草地原状土试样的抗剪强度得以提升。因为土壤和根系在变形模量上存在显著性差异,当草地原状土试样受到外力载荷时,土壤和根系的相对位置发生改变或有改变趋势,这种变化使得土体和根系之间产生摩擦力,根系和土体之间的摩擦力、黏聚力等作用将根系的抗拉强度和土体的抗剪强度结合起来,根系承受了部分剪应力,进而提高了草地原状土试样的抗剪强度[8,34-35]。

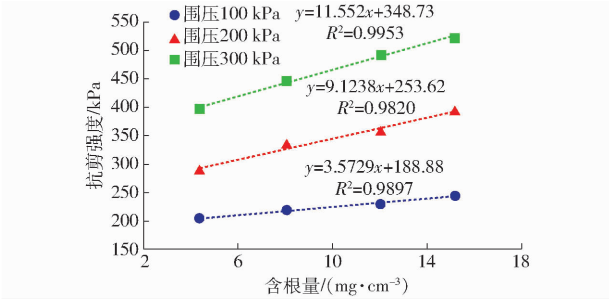


图 6 草地原状土试样的抗剪强度变化曲线

Fig. 6 Shear strength of undisturbed grassland soil samples

在相同含根量下，草地原状土的抗剪强度随着围压的增加而增加。在进行草地切根作业时，特别是复式作业时，尽量一次达到作业目的，应减少作业机具对草地的压实，防止草地抗剪强度增大而加大切根难度。草地原状土的抗剪强度随草地盖度的增加而增加，切根机械的功率损耗也随之增大，同时对切根刀的强度要求也逐渐提高。由于草地表层实际围压较小，按照围压 100 kPa 时最高含根量草地的抗剪强度对切根刀进行设计，即切根刀对草地的剪切强度应大于 243.03 kPa。在保证切根刀强度的同时，应减小切根刀的厚度以及切根刀与土壤的接触面积，从而减小草地受到的扰动破坏和切根刀的切根阻力[36]。

在抗剪强度 σ -黏聚力 c 平面图上绘制抗剪强度包络线，以盖度为 70% ~100% 的一组草地原状土为例，包络线在纵坐标的截距即为黏聚力，如图 7 所示。黏聚力反映复合体内部之间的粘结能力，从低到高 4 种盖度下草地原状土试样的黏聚力分别为 37.13、47.91、50.17、52.13 kPa，随着草地盖度的提高，草地原状土试样的黏聚力也随之增大，其变化趋势与含根量随草地盖度的变化规律一致，结合此情况，可推断草地中的根系增加了草地土壤黏聚力[6]。

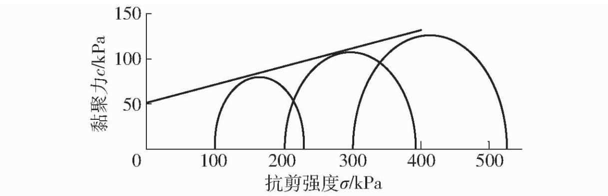


图 7　草地原状土试样的抗剪强度包络线

Fig. 7　Envelope of shear strength of undisturbed grassland soil samples

2.2.2　草地原状土弹性模量

弹性模量是土壤抵抗弹性应变的能力，弹性模量越大，材料越不易因受到外力而发生变形。弹性模量可以从应力-应变曲线的线性部分得到[37]，其可定义为 1.0% 轴向应变处的应力增量与轴向应变增量的比值[38]，计算公式为

$$M = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{1.0\%} - \sigma_0}{\varepsilon_{1.0\%} - \varepsilon_0} \tag{1}$$

式中　M——弹性模量，MPa

$\Delta\sigma$——应力增量，MPa

$\Delta\varepsilon$——轴向应变增量

$\sigma_{1.0\%}$——轴向应变 1.0% 时的应力，MPa

$\varepsilon_{1.0\%}$——1.0% 轴向应变

σ_0——初始应力，MPa

ε_0——初始应变

图 8 为各试验条件下草地原状土试样的弹性模量。在同一盖度下，随着围压的增大草地原状土试样的弹性模量随之增大；而在同一围压下，随着盖度的增大草地原状土试样的弹性模量也随之增大。随着草地盖度的增大，地下根系含量增多且根系聚集深度逐渐加深，对草地土壤起到锚固的作用，使得草地土壤-根系复合体结构抵抗变形的能力增强。

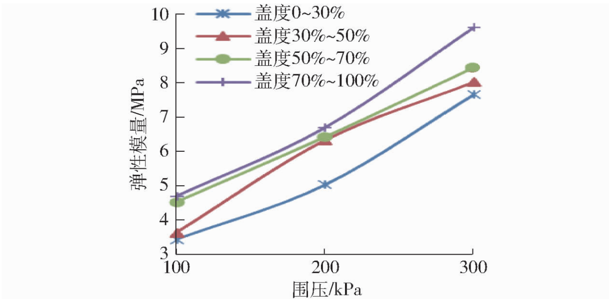


图 8　草地原状土试样弹性模量变化曲线

Fig. 8　Elastic modulus of undisturbed grassland soil samples

割线模量 E_{50}是指土体峰值应力一半时的应力与对应的应变比值，反映了土体的平均刚度，图 9 为各试验条件下草地原状土试样的割线模量。从图 9 可以发现，割线模量和弹性模量有着相同的变化趋势，且两者的变化情况均受围压的影响较大。

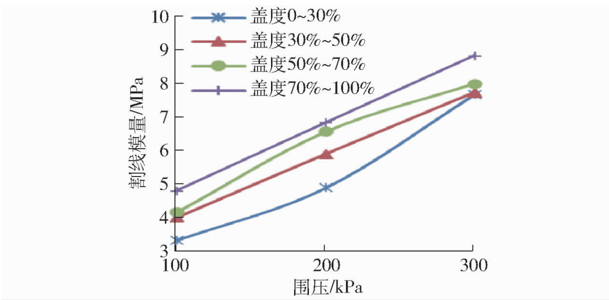


图 9　草地原状土试样割线模量变化曲线

Fig. 9　Secant modulus of undisturbed grassland soil samples

表 2 为割线模量和弹性模量的相对误差，在所有试验条件下，两者的相对误差均小于 10%，故在进行相关仿真计算和数值分析时可用割线模量代替弹性模量[39]。

表 2　弹性模量和割线模量的相对误差

Tab. 2　Relative error of elastic modulus and secant modulus　　%

围压/kPa	盖度/%			
	0 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 70	70 ~ 100
100	4.58	8.23	9.36	1.66
200	3.41	7.61	1.82	1.75
300	0.13	3.83	5.65	8.78

总体上看，退化草地的抗剪强度、黏聚力、弹性模量、割线模量等随着盖度的增大而发生规律性的变化，研究发现，这些变化与根系的分布特征存在极大关联。

2.3 退化草地复合体强度特性影响因素

为探究含根量、根系直径、根系聚集深度对土壤-根系复合体强度特性的影响，进行单因素试验条件下重塑土试样的三轴试验，重塑土的试验条件和原状土保持一致。各试验因素水平如表3所示，因素固定水平分别设置含根量为12 mg/cm^3、根系直径为0.75 mm、根系聚集深度为125 mm。同时设置素土试样（不添加根系）为对照组，进行围压为100 kPa的三轴试验。

表3 根系特征的试验因素水平

Tab.3 Single factor level of root characteristics

水平	因素		
	含根量/(mg·cm^{-3})	根系直径/mm	根系聚集深度/mm
1	4	0.15	25
2	8	0.45	50
3	12	0.75	75
4	16	1.05	100
5	20	1.35	125

2.3.1 含根量对重塑土试样强度特性的影响

含根量单因素试验条件下各重塑土试样的应力-应变曲线如图10所示。重塑土试样的抗剪强度随着含根量的增加呈现先增加后减小的趋势，且在含根量为12 mg/cm^{3}时重塑土试样的抗剪强度最高，这与张锋等[14]的研究结果类似。

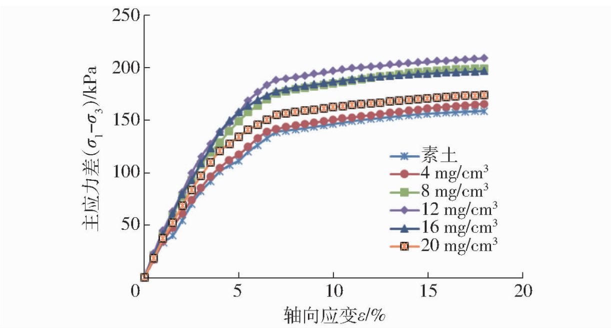


图10 重塑土试样的应力-应变曲线（含根量单因素试验）

Fig.10 Stress - strain curves of remolded soil samples (single factor test of root content)

由于草地根系密度小于土壤密度，当加筋率（重塑土试样的含根量）达到某一临界值时，将会影响重塑土试样的压实强度，进而影响重塑土试样的抗剪强度[40]。定义加筋强度比 R 为加筋土偏应力与未加筋土偏应力的比值，计算公式为

$$R=\frac{\sigma_{4r}}{\sigma_{4u}} \tag{2}$$

式中 σ_{4r}——加筋土偏应力，kPa

σ_{4u}——未加筋土偏应力，kPa

选取轴向应变4%、8%、12%、16%时的偏应力计算重塑土试样的加筋强度比，如图11所示。在不同轴向应变下，随着含根量的增加，草地重塑土试样的加筋强度比变化趋势相同，均呈现先增加后减小的趋势，且加筋强度比的峰值均出现在含根量为12 mg/cm^{3}时。对于该种重塑土试样，存在最优含根量（12 mg/cm^3）使其抗剪强度和加筋强度比最高。

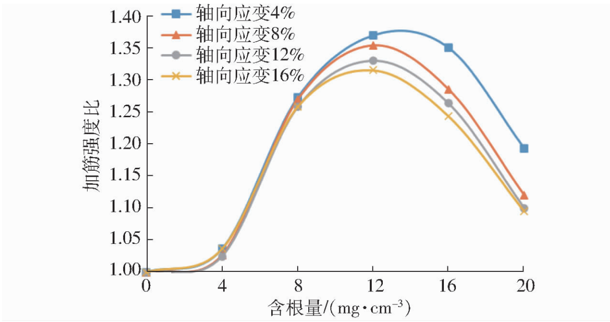


图11 重塑土试样加筋强度比变化曲线

Fig.11 Reinforcement strength ratio of remolded soil samples

盖度为30%～50%与50%～70%退化草地的含根量分别为8.058、12.033 mg/cm^3，与含根量水平为8、12 mg/cm^{3}的重塑土试样极为接近，通过其对草地原状土试样与重塑土试样抗剪强度的关系进行比较。与草地原状土试样相比，在相同围压下的重塑土试样的抗剪强度普遍降低，这与“学界普遍认为原状根系与土体间有着更牢固的接触关系”相一致[13]。

2.3.2 根系直径对重塑土试样强度特性的影响

根系直径单因素试验条件下各重塑土试样的应力-应变曲线如图12所示，重塑土试样的抗剪强度随着根系直径的增大呈先增大后减小的趋势。当重塑土试样中所添加根系的直径为1.05 mm时，其抗剪强度最大。当根系直径过小时，根系的抗拉强度较小，其对土体起到的加筋作用有限；当根系直径由0.15 mm增加至1.05 mm时，根系的抗拉强度变大，重塑土试样的抗剪强度也持续增强。

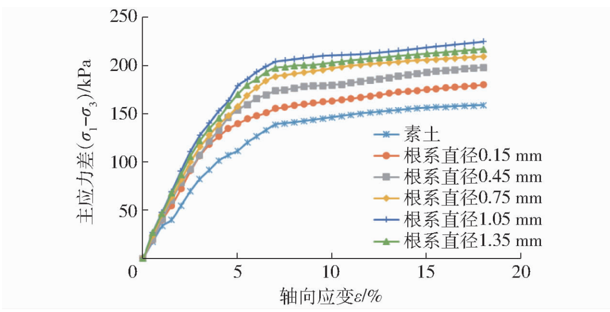


图12 重塑土试样的应力-应变曲线（根系直径单因素试验）

Fig.12 Stress - strain curves of remolded soil samples (single factor test of root diameter)

在根系直径单因素试验中，各重塑土试样内的根系质量相同，当试样内的根系直径由1.05 mm增

大至 1.35 mm 时，试样内根系的表面积变小，即根系与土壤的接触面积减小，使得重塑土试样的黏聚力减小[9]。另一方面，细根与土壤颗粒结合比较紧密，土壤-根系复合体之间的摩擦力较大，抵抗拉脱的能力较强[41]，当根系过粗时，粗根与土壤颗粒的结合紧密程度不如细根，故重塑土试样的抗剪强度也随之减小。

2.3.3 根系聚集深度对重塑土试样强度特性的影响

根系聚集深度单因素试验条件下各重塑土试样的应力-应变曲线如图 13 所示，重塑土试样的抗剪强度随着根系聚集深度的加深而增大。由于三轴试样的尺寸限制，本次试验所能达到的最大根系聚集深度为 125 mm，未能达到最高草地盖度下的根系聚集深度。当根系聚集深度为 25、50、75、100、125 mm 时，土壤-根系复合体占据整个重塑土试样的比例分别为 20%、40%、60%、80%、100%，重塑土试样的抗剪强度也随着该比例的增大而增大。

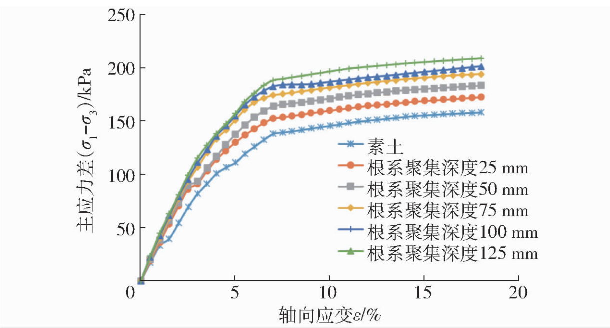


图 13　重塑土试样的应力-应变曲线(根系聚集深度单因素试验)

Fig. 13　Stress - strain curves of remolded soil samples (single factor test of root aggregation depth)

因为处于根系聚集深度之上部分的重塑土试样含根量(可理解为根系分布密度)一致，所以随着根系聚集深度的加深，重塑土试样内的根系质量越大，其内部土壤与根系有效结合的部分增多，这也使得重塑土试样的黏聚力增大，故重塑土试样的抗剪强度也随之增大。

在 3 项单因素试验中，所有重塑土试样的应力-应变曲线均呈现硬化特征，没有出现明显的峰值，与草地原状土试样的应力-应变曲线类似。添加根系使得重塑土试样的黏聚力增大，故添加有根系的重塑土试样的抗剪强度均大于素土试样，并且含根量、根系直径、根系聚集深度均对重塑土试样的抗剪强度产生了直接影响。在相同试验条件下，重塑土试样的抗剪强度小于草地原状土试样，这是因为草地原状土中生长较为活跃根系的分泌物可对土壤颗粒起到粘结作用[41]；而重塑土试样中所添加的根系不处于生长状态，故无法对土壤颗粒起到粘结作用。

3　三轴试验数值模拟

通过每组 3 个土样的三轴试验可得到不同盖度退化草地的强度特性参数值，但 3 个土样需要完全相同，现实情况下无法通过实地取样或重塑土样制备来满足这一条件。可通过 ABAQUS 仿真软件构建草地土壤有限元模型及仿真三轴试验，进一步验证草地土壤的应力-应变关系。

在进行仿真试验时，使用 Mohr - Coulomb 模型。大量的工程实践证明，Mohr - Coulomb 强度准则可较好地描述土体材料的强度特性和变形破坏行为，其表达式为

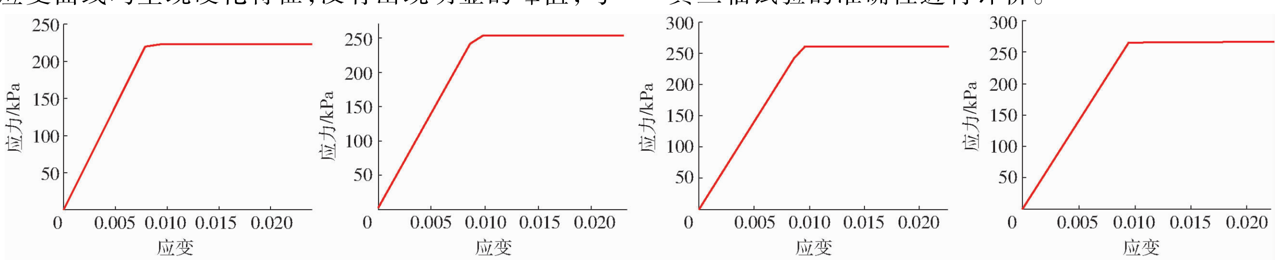
$$\sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} = 0 \tag{3}$$

其中

$$N_\varphi = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \tag{4}$$

式中　φ——内摩擦角，(°)

验证草地土壤的应力-应变关系，可利用三轴试验的对称性将其简化为轴对称问题，在 ABAQUS 中建立一个轴对称的二维矩形，尺寸为 0.030 9 m × 0.125 m。设置该模型的杨氏模量为 7 MPa，内摩擦角为 21.3°，泊松比为 0.25[6,42]，模型的加载条件与实际三轴试验相同。根据围压为 100 kPa (σ_3 = 100 kPa)时各盖度草地原状土试样的试验结果，改变仿真三轴试验的黏聚力，得到同一围压下各仿真三轴试验的应力-应变变化曲线如图 14 所示。通过分析仿真三轴试验和草地原状土试样得到的抗剪强度之间的关系，对该本构模型参数下的草地土壤仿真三轴试验的准确性进行评价。



(a)黏聚力为37.13 kPa　(b)黏聚力为47.91 kPa　(c)黏聚力为50.17 kPa　(d)黏聚力为52.13 kPa

图 14　仿真三轴试验的应力-应变曲线

Fig. 14　Stress - strain curves of simulated triaxial test

仿真三轴试验的应力极限值略高于实际三轴试验,但仿真三轴试验的应力-应变曲线和实际三轴试验的变化趋势基本一致,也呈现硬化型。随着黏聚力的增大,各仿真曲线的偏应力极限值也随之增大。如表4所示,不同盖度下原状土试样偏应力的极限值与仿真三轴试验相比,相对误差均小于8%;并且,原状土试样偏应力极限值的增长率与仿真三轴试验相比,相对误差也均小于8%。可以认为,应用该本构参数模拟草地土壤的三轴试验具有较高的可靠性和准确性;同时,所选取的本构参数也可为草地土壤在ABAQUS中的仿真建模提供参考。

表4 草地原状土及仿真三轴试验结果

Tab.4 Undisturbed soil samples and simulation triaxial test results

三轴试验类别	试验参数	盖度/%			
		0~30	30~50	50~70	70~100
原状土三轴试验	黏聚力/kPa	37.13	47.91	50.17	52.13
	偏应力极限值/kPa	209.0	237.2	242.2	247.5
	相比最低盖度的增长值/kPa		28.2	33.2	38.5
	增长率/%		13.49	15.89	18.42
仿真三轴试验	偏应力极限值/kPa	222.71	254.25	260.86	266.59
	与原状土偏应力极限值的相对误差/%	6.56	7.19	7.70	7.71
	相比最低盖度的增长值/kPa		31.54	38.15	43.88
	增长率/%		14.16	17.13	19.70
	与原状土三轴试验增长率的相对误差/%		4.97	7.80	6.95

4 结论

(1)随着草地退化程度加剧,草地含根量、根系聚集深度、坚实度逐渐变小。当草地盖度较高时(大于70%),草地切根深度可定在16 cm左右,当草地盖度减小20%,草地切根深度应减小3 cm。相应地,切根机械的切根深度应在7~16 cm范围内可调。

(2)草地复合体的黏聚力、抗剪强度、弹性模量及割线模量均随草地盖度的增加而增大,对切根刀强度和减阻效果的要求也逐渐提高。在切根刀对草地的剪切强度达到243.03 kPa的前提下,同时减小切根刀的厚度和宽度,以减小切根刀的前进阻力和对草地的扰动破坏。进行草地切根作业时,减少作业机具对草地的压实,防止草地抗剪强度随围压的增大而增大。

(3)所得到的本构参数可应用于草地土壤在ABAQUS中的数值建模,并可用割线模量代替弹性模量。不同盖度下,原状土试样偏应力极限值以及偏应力极限值的增长率与仿真三轴试验的相对误差均小于8%,在该本构参数下开展仿真三轴试验具有较高的准确性。

参 考 文 献

[1] 郭维俊,黄高宝,王芬娥,等.土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究[J].中国农业大学学报,2006,11(2):35-38.
GUO Weijun, HUANG Gaobao, WANG Fen'e, et al. Study on constitutive relation of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(2): 35-38. (in Chinese)

[2] 尤泳,王德成,王光辉.9QP-830型草地破土切根机[J].农业机械学报,2011,42(10):61-67.
YOU Yong, WANG Decheng, WANG Guanghui. 9QP-830 soil-gashing and root-cutting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 61-67. (in Chinese)

[3] 贺长彬.天然草地土壤-根系复合体与窄齿类耕作部件作用关系研究[D].北京:中国农业大学,2018.
HE Changbin. Interaction relationship research of soil-root composite and narrow tillage tools on natural grassland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[4] 马文鹏,尤泳,王德成,等.多年生苜蓿地切根补播机低阻松土铲设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(2):86-95,144.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of low-resistance soil loosening shovel for cutting roots and reseeding in perennial alfalfa field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 86-95, 144. (in Chinese)

[5] 宝音陶格涛.不同改良措施下退化羊草(*Leymus chinensis*)草原群落恢复演替规律研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2009.
BAO Yintaogetao. The study on dynamice succession of community in degraded steppe of *Leymus chinensis* after different omprovement measures[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2009. (in Chinese)

[6] 贺长彬,尤泳,王德成,等.退化草地复合体力学特性与影响因素研究[J].农业机械学报,2016,47(4):79-89.
HE Changbin, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Mechanical characteristics of soil-root composite and its influence factors in degenerated grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 79-89. (in Chinese)

[7] 林金天.土壤动力特性与节能耕作及机具设计[J].农业机械学报,1996,27(增刊):42-46.
LIN Jintian. Soil dynamic properties and saving tillage energy and implements design[J]. Transactions of the Chinese Society

for Agricultural Machinery, 1996, 27(Supp.): 42 – 46. (in Chinese)

[8] 陈终达,肖宏彬,张春晓,等. 根系分布方式对根-土复合体抗剪强度的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(8):130 – 135.
CHEN Zhongda, XIAO Hongbin, ZHANG Chunxiao, et al. The impact of root distribution methods on the shear strength of root-soil composite[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(8): 130 – 135. (in Chinese)

[9] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(5):67 – 72.
LIU Xiuping, CHEN Lihua, SONG Weifeng. Study on the shear strength of forest root – loess composite[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006,28(5): 67 – 72. (in Chinese)

[10] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报,2014,45(5):125 – 130,172.
ZHENG Zicheng, ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, et al. Change characteristics and influencing factors of soil shear strength during maize growing period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 125 – 130, 172. (in Chinese)

[11] 赵旭,张祖立,黄秋波,等. 玉米根土复合体剪切性能试验[J]. 农业机械学报,2013,44(8):126 – 132.
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, HUANG Qiubo, et al. Cutting performance of corn root – soil composite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 126 – 132. (in Chinese)

[12] 郑乐,罗锡文,曾山,等. 水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验[J]. 农业机械学报,2017,48(5):63 – 71.
ZHENG Le, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Shear characteristics of rice root – soil composite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 63 – 71. (in Chinese)

[13] 王元战,刘旭菲,张智凯,等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(8):1405 – 1410.
WANG Yuanzhan, LIU Xufei, ZHANG Zhikai, et al. Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1405 – 1410. (in Chinese)

[14] 张锋,凌贤长,吴李泉,等. 植被须根护坡力学效应的三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊 2):3979 – 3985.
ZHANG Feng, LING Xianzhang, WU Liquan, et al. Triaxial experiment study of mechanical effect of slope protection with vegetation fibril[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.2): 3979 – 3985. (in Chinese)

[15] 陈昌富,刘怀星,李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(10):2041 – 2045.
CHEN Changfu, LIU Huaixing, LI Yaping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041 – 2045. (in Chinese)

[16] 张昭,郭呈周,肖昭然. 基于修正剑桥模型的三轴试验仿真模拟[J]. 岩土力学,2007,28(9):1949 – 1953.
ZHANG Zhao, GUO Chengzhou, XIAO Zhaoran. Simulation analysis of triaxial test based on modified cam clay model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1949 – 1953. (in Chinese)

[17] 高亚琛. 白洋淀粉质黏土抗剪强度试验研究及数值模拟[D]. 保定:河北大学,2019.
GAO Yachen. Experimental study and numerical simulation on shear strength of starch clay[D]. Baoding: Hebei University, 2019. (in Chinese)

[18] 宁雷. 三轴土样应力应变试验结果的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2018.
NING Lei. Numerical simulation of the triaxial test for soil stress-strain behavior[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)

[19] 王路,王成武,戈振扬. 土壤-耕作部件相互作用的研究进展[J]. 农机化研究,2012,34(12):7 – 11,20.
WANG Lu, WANG Chengwu, GE Zhenyang. Review of the interaction between soil and tillage parts[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(12): 7 – 11, 20. (in Chinese)

[20] YOU Yong, WANG Decheng, LIU Jude. A device for mechanical remediation of degraded grasslands[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 118(1): 1 – 10.

[21] 赵林,盛煜. 多年冻土调查手册[M]. 北京:科学出版社,2015.

[22] 刘鑫,王一博,杨文静. 青藏高原植被退化背景下土壤质量评价方法研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(2):143 – 153.
LIU Xin, WANG Yibo, YANG Wenjing. Study on soil quality evaluation methods under the background of vegetation degradation in Qinghai – Tibet Plateau[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2020, 56(2): 143 – 153. (in Chinese)

[23] NY/T 1121.4—2006 土壤检测第 4 部分:土壤容重的测定[S]. 2006.

[24] NY/T 1121.3—2006 土壤检测第 3 部分:土壤机械组成的测定[S]. 2006.

[25] 吕英华,秦双月. 测土与施肥[M]. 北京:中国农业出版社,2002.

[26] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999.

[27] 付小敏,张品翠. 土工试验基础教程[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.

[28] 李丽华,余肖婷,肖衡林,等. 稻壳灰加筋土力学性能研究[J]. 岩土力学,2020,41(7):2168 – 2178.
LI Lihua, YU Xiaoting, XIAO Henglin, et al. Mechanical properties of reinforcement about rice husk ash mixed soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2168 – 2178. (in Chinese)

[29] NOORZAD R. Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4): 386 – 392.

[30] 汪恩良,姜海强,付强,等. 冻融对饱和渠基土物理力学性质的影响[J]. 农业机械学报,2018,49(3):287 – 294.
WANG Enliang, JIANG Haiqiang, FU Qiang, et al. Experiment on effect of freezing and thawing on physical and mechanical properties of saturated channel foundation soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 287 – 294. (in Chinese)

[31] 李小昱,雷廷武,王为. 土壤抗压强度的试验研究[J]. 农业工程学报,2001,17(5):19 – 21.
LI Xiaoyu, LEI Tingwu, WANG Wei. Experimental research on unconfined compression strength of soil[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 19 – 21. (in Chinese)

[32] 李勇,赵云泽,勾宇轩,等. 黄淮海旱作区农田耕层土壤结构特征与其影响因素[J]. 农业机械学报,2022,53(3):321 – 330.
LI Yong, ZHAO Yunze, GOU Yuxuan, et al. Characteristics and influencing factors of topsoil structure of farmland in dry farming region of Huang – Huai – Hai[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 321 – 330. (in Chinese)

[33] 石浥尘,杨军,李秀明,等. 林地根系对土壤抗冲性影响[J]. 中国水运(下半月),2011,11(11):165 – 166.

[34] 陈能,肖宏彬,李珍玉,等.应力路径对根-土复合体抗剪强度的影响[J].公路工程,2015,40(3):19-24,56.
CHEN Neng, XIAO Hongbin, LI Zhenyu, et al. The effects of stress path on the shear strength of soil-root composite[J]. Highway Engineering, 2015, 40(3): 19-24, 56. (in Chinese)

[35] 万利,王震洪,杨成波.生态修复区不同植物群体的根系固土力学机理[J].农业工程学报,2009,25(10):278-283.
WAN Li, WANG Zhenhong, YANG Chengbo. Mechanical mechanism of soil-reinforcement for different plant communities in ecological restoration region[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 278-283. (in Chinese)

[36] 尤泳.退化羊草草地机械化破土切根改良技术优化研究[D].北京:中国农业大学,2011.
YOU Yong. Mechanical remediation technology of degraded (*Leymus-chinensis*) by soil-gashing and root-cutting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[37] LI Lin, SHAO Wei, LI Yadong, et al. Effects of climatic factors on mechanical properties of cement and fiber reinforced clays[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(3): 537-548.

[38] PRAVEEN K, SHALENDRA P S. Fiber-reinforced fly ash subbases in rural roads[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(4): 171-180.

[39] GRZYBFADDOUL A M. Numerical analysis of the reinforcement of existing foundations by the soil mixing technique[D]. Lyon: Institut National des Sciences Appliquees (INSA), 2014.

[40] 郝建斌,魏兴梅,姚婕,等.麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(6):764-768,831.
HAO Jianbin, WEI Xingmei, YAO Jie, et al. Strength characteristics and mesostructure of wheat straw reinforced soil[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(6): 764-768, 831. (in Chinese)

[41] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 144-152. (in Chinese)

[42] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1877-1884.
LI Guorong, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Numerical simulation of shrub roots for slope protection effects on loess area of Northeast Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1877-1884. (in Chinese)

(上接第 315 页)

[16] YANG K, JIE H, TANG W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.

[17] 谢娟,粟晓玲.基于 LMDI 的灌溉需水量变化影响因素分解[J].农业工程学报,2017,33(7):123-131.
XIE Juan, SU Xiaoling. Decomposition of factors affecting changes in irrigation water demand based on LMDI[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 123-131. (in Chinese)

[18] 马亚强.柴达木盆地生态需水量研究[D].西安:长安大学,2019.
MA Yaqiang. Research on ecological water demand in Qaidam Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)

[19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.

[20] 孙爱华,朱士江,张忠学.三江平原水稻水分生态效益试验研究[J].灌溉排水学报,2010,29(3):109-111.
SUN Aihua, ZHU Shijiang, ZHANG Zhongxue. Experimental study on water ecological benefit of rice in Sanjiang Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 109-111. (in Chinese)

[21] 聂堂哲,张忠学,齐智娟,等.1960—2015 年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J].农业机械学报,2019,50(5):279-290.
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of rice water demand in Heilongjiang Province from 1960 to 2015[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 279-290. (in Chinese)

[22] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496.
ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparative analysis of trend test methods based on Chinese meteorological data[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese)

[23] TALAEE P H, SABZIPARVAR A A, TABARI H. Observed changes in relative humidity and dew point temperature in coastal regions of Iran[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2012, 110(3): 385-393.

[24] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global & Planetary Change, 2013, 100: 172-182.

[25] 王孝礼,胡宝清,夏军.水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J].武汉大学学报(工学版),2002,35(2):10-12.
WANG Xiaoli, HU Baoqing, XIA Jun. R/S analysis method of hydrological time series trends and variation points[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2002, 35(2): 10-12. (in Chinese)

[26] ZHAO X, CHEN X, HUANG Q. Trend and long-range correlation characteristics analysis of runoff in upper Fenhe River basin[J]. Water Resources, 2017, 44(1): 31-42.

[27] WRIGHT S. The method of path coefficients[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1934, 5(3): 161-215.

[28] BHAAT G M. Significance of path coefficient analysis in determining the nature of character association[J]. Euphytica, 1973, 22(2): 338-343.

[29] 袁志发,周静芋,郭满才,等.决策系数——通径分析中的决策指标[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,29(5):131-133.
YUAN Zhifa, ZHOU Jingyu, GUO Mancai, et al. Decision coefficient—the decision index in path analysis[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2001, 29(5): 131-133. (in Chinese)

[30] DEWEY D R, LU K H. A correlation and path-coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production[J]. Problemy Tuberkuleza, 1959, 51(9): 70-74.

[31] 杜家菊,陈志伟.使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J].生物学通报,2010,45(2):4-6.