

退化草地复合体力学特性与影响因素研究

贺长彬 尤 泳 王德成 王光辉 武红剑 龚双杰

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为采用机械手段有效打破高坚实度退化草地板结性土层形成的土壤-根系复合体结构,对退化草地形成的复合体结构基本力学特性进行了研究。通过测定退化草地复合体的紧实程度、容重、含水率、孔隙度和含根量分布,对退化草地形成的复合体的物理性状进行了分析;通过对复合体原状试样进行剪切、无侧限压缩和回弹模量试验,对复合体的抗剪、无侧限抗压和回弹等基本力学特性进行了研究,并在此基础上通过正交试验探讨了容重、含水率和含根量对上述力学特性的影响。研究发现,退化草地形成的复合体具有加剧土壤紧实程度、聚集根系向浅层分布等特征;复合体的抗剪强度、无侧限抗压强度和回弹模量因根系的存在与无根系分布的土层相比有很大变化;复合体容重、含水率和含根量均对其力学特性产生了影响,且各因素的影响存在交互作用,根系的存在可增强复合体结构的抗剪强度和无侧限抗压强度,但对于回弹模量的影响却表现出一定的差异性。

关键词: 退化草地; 土壤-根系复合体; 力学特性

中图分类号: S151.9⁺2; S283 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0079-11

Mechanical Characteristics of Soil-root Composite and Its Influence Factors in Degenerated Grassland

He Changbin You Yong Wang Decheng Wang Guanghui Wu Hongjian Gong Shuangjie

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil-root composites exist in the degenerated grasslands with high compaction level. In order to break the soil-root composites effectively by mechanical means, the mechanical characteristics of soil-root composites were studied. The physical characteristics of soil-root composites were analyzed, including the compaction, bulk density, moisture content, porosity and root content. Shear strength, unconfined compressive strength and resilience modulus were measured and analyzed, and the influence factors were discussed, which were the bulk density, moisture and root contents. An orthogonal experiment was conducted to evaluate the effects of influence factors on the mechanical properties. The experiment results indicated that the composites in degenerated grassland aggravated soil compaction and gathered roots to distribute in shallow soil layer. The shear strength, unconfined compressive strength and resilience modulus varied with the change of bulk density, moisture content and root content, the interaction effects existed among these factors. The bulk density and moisture content showed significant influences on the internal friction angle ($P < 0.05$). The cohesion and unconfined compressive strength were significantly influenced by moisture content ($P < 0.05$). The shear and unconfined compressive strengths were strengthened as a result of the existence of root system, while its influence on resilience modulus was different. The composites were prone to be broken by mechanical means at high moisture content.

Key words: degenerated grassland; soil-root composite; mechanical characteristics

收稿日期: 2015-10-01 修回日期: 2015-12-09

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51405493)和现代农业产业技术体系专项(CARS-35)

作者简介: 贺长彬(1991—),男,博士生,主要从事农业机械化工程研究,E-mail: changbin_he@126.com

通信作者: 尤泳(1980—),男,博士,主要从事牧草机械研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

引言

以根茎型或根茎疏丛型牧草为建群种的草地,其多年生禾草的地下横走根茎盘根错节,与草地土壤交织在一起形成土壤-根系复合体结构(以下简称“复合体”),导致土壤紧密程度增加,通气、透水能力变差,抑制牧草生长,成为草地退化的主要原因^[1]。采用机械手段打破草地土壤的复合体结构,为牧草复壮促生提供适宜的土壤环境是改良该类退化草地的一个重要途径^[2-4]。目前,以农田土壤环境下的土壤力学特性为理论基础研发的草地改良作业部件大多难以适应机械化改良退化草地的农艺与工艺要求。虽然国内外对土壤复合体结构已有研究,但这些复合体结构的根系大都以直立方式扎根土壤,研究内容主要集中在复合体的固土机理、抗水蚀特性、抗剪抗压等力学特性、根系-土壤界面摩阻特性、根系对土体的加筋效应、根系力学特性等方面,其目的在于实现有效加固或人为形成复合体结构,主要应用于固土护坡、土壤侵蚀和荒漠化治理、水土保持等方面^[5-8],而对于如何实现有效打破这种复合体结构暂无相关研究。

本文以退化草地土壤环境下牧草地下横走根系与土壤形成的特有复合体结构为研究对象,参考现有的复合体力学特性及土工试验的研究方法,通过测定退化草地复合体的紧实度、容重、含水率、孔隙度和含根量分布,对退化草地形成的复合体的物理性状进行分析;通过对复合体原状土进行剪切试验、无侧限压缩试验和回弹模量试验,对复合体的抗剪特性、无侧限抗压特性和回弹特性等基本力学特性进行研究,并在此基础上通过正交试验分析容重、含水率和含根量对上述力学特性的影响,从而丰富退化草地环境下的土壤-根系复合体结构相关研究,旨在为退化草地改良机具及关键耕作部件的设计与优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 试验地概况

试验取样地点位于河北沽源草地生态系统国家野外科学观测研究站内(115°41'E,41°45'N,海拔高度1400 m)的天然草地,年均气温1.4℃,大于10℃的年积温为1513.1℃,无霜期110 d左右,年均降水量约350 mm,站内地带性植被类型为“羊草+克氏针茅+杂草”^[1],该地区土壤质地属于壤土,但砂粒含量相对较高,土壤特性偏向于砂土特性^[9],能代表草地土壤普遍特性。取样地块主要的植被类型为

羊草,羊草属多年生禾草,无性更新能力强,生长多年后具有发达的地下横走根系^[10]。取样地羊草生长时间为5 a以上,试验地在进行该试验之前处于自由放牧状态。

退化草地形成的土壤-根系复合体结构如图1所示。



图1 退化草地土壤-根系复合体结构

Fig. 1 Soil-root composite of degenerated grassland

1.1.2 试验地复合体物理特性调查

于2015年5月9日在试验地内按距地表深度0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm分层,对各深度土层土壤进行粒级分析并测定复合体结构的紧实度、容重、含水率、孔隙度及含根量。使用自封口塑料袋采集土样,利用比重计法进行土壤粒级分析^[11]。使用土壤紧实度仪(TJSD-750型,杭州托普仪器有限公司,探头直径2.5 cm,锥度30°)沿“S”形曲线选取15处测定点分别测量各土层范围内最大紧实度。随机选取3个测定点,每个测定点相同深度土层平行取4个土样,使用环刀法^[12]测定复合体容重,用烘干法^[13]测定复合体含水率并计算孔隙度^[14]。每个测定点相同土层深度下平行取2个土样,用冲刷方式分离出根系,清洗干净后烘干用自封口袋封存,使用称量法测量各土层深度的含根量^[5]。

1.1.3 复合体力学特性试验取样与制样

在1.1.2节所述的每个测定点同一深度土层下进行4次平行取样(每个取样点4层深度下取的试样为一组)作为剪切试验所需的复合体原状试样;在每个测定点各取样2组分别作为无侧限压缩试验和回弹试验所需复合体原状试样。采用环刀法取土样,取样后在环刀上缠绕保鲜膜封住环刀两端防止水分散发损失,并在环刀两端夹上硬纸板,用塑料胶带固定住,防止内部试样在运输过程中受扰动,随后带回室内进行测定^[15]。

在试验地取样点附近挖取足量复合体,装入自封口塑料袋带回室内,将土壤与根系剥离,用水冲刷清洗根系后,分别将根系和土壤进行烘干^[16],土壤过2 mm孔径的筛去除残余根系,将获得的根系和土壤用于制备扰动复合体试样。以复合体整体的含水率和含根量为计算根据,计算并称取制备试样所

需的烘干土壤质量、根系质量和加水量,将烘干的土壤、根系和水充分混合,根系在土壤中随机分布,采用压样法用单向压样器配置扰动复合体试样^[15]。试样压制好后在环刀外缠绕保鲜膜进行保湿,放置一昼夜使制备的扰动试样内部的土壤、根系和水分尽量相互融合,然后进行试验。

1.1.4 复合体力学特性影响因素正交试验设计

采用扰动复合体试样对复合体力学特性影响因素进行研究,考虑到完全随机试验所需样品多,样品制样及试验比较繁琐,采用正交试验法研究容重、含水率和含根量对复合体抗剪强度、无侧限抗压强度和回弹模量等力学特性的影响。

采用 $L_8(2^7)$ 正交表(包含交互作用),以扰动复合体内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度和回弹模量为目标值对各影响因素进行直观分析和方差分析,找出各影响因素与各指标之间的关系。各影响因素正交试验的因素水平基于 1.1.2 节所述调查结果设定,如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平
Tab.1 Orthogonal factors and levels

水平	因素		
	容重 $A/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率 $B/\%$	含根量 $C/$ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	1.2	16.52	0
2	1.5	24.68	10

注:含水率为试验实际含水率,设计含水率分别为 20% 和 33% (均为质量含水率)。

1.2 试验仪器及试验方法

使用 ZJ 型应变控制式直剪仪在 4 种不同垂直

压力(100、200、300、400 kPa)下以 0.8 mm/min 的剪切速度进行剪切试验,使试样在 3 ~ 5 min 内减损;使用 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪进行无侧限压缩试验,采用每分钟应变为 1% ~ 3% 的轴向应变速率进行试验,每隔 0.5% 应变(或 0.4 mm)读数一次,在 8 ~ 10 min 内完成试验;使用 WG 型单杠杆固结仪进行回弹模量试验,测定 25、50、100、200 kPa 压力下的回弹变形,绘制压力与回弹形变关系($p-l$)曲线,取 $p-l$ 曲线的直线段计算试样的回弹模量^[15]。

由于试样的回弹模量是取 $p-l$ 曲线的直线段计算的,所以压力 p 与回弹形变 l 之间存在线性关系,为了便于分析回弹模量的影响因素,以计算回弹模量作为正交试验中复合体回弹特性的指标,试样的计算回弹模量计算式为

$$E_e = \frac{2.5\pi D}{k}(1-\mu^2)$$
 (1)

式中 E_e ——回弹模量,kPa
 D ——加压盖直径,cm
 μ ——土的泊松比,取 0.35
 k ——单位压力与回弹变形曲线斜率,kPa/mm

1.3 数据处理与分析

通过 Excel 2007 和 SPSS 21.0 对试验的数据进行处理和分析,并用 Excel 2007 绘图。

2 复合体力学特性试验结果与分析

2.1 复合体结构物理特性

各土层深度土壤的粒级分析结果如表 2 所示。

表 2 不同深度土层的土壤粒级分析结果(质量分数)
Tab.2 Soil particle fractions analysis result in different soil depths

土层深度/ cm	砂粒粒径/mm				粉粒粒径/mm	粘粒粒径/mm		%
	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	0.005~0.002	小于 0.002	
0~5	2.1	9.8	30.1	19.8	28	4.2	6	
5~10	1.3	6.3	28.4	26.8	27	4.2	6	
10~15	2.9	9.7	24.5	16.8	35	3.2	8	
15~20	2.8	9.4	25.8	19.8	32	8.2	2	

土壤粒级分析结果表明,试验区域内各土层深度内土壤粒级中砂粒含量相对较高,粘粒含量相对较少,土壤质地为砂壤土。

4 个土层深度下的复合体紧实度、容重、含水率和孔隙度如表 3 所示。

复合体的紧实度随土层深度的增加呈现先增大后减小的趋势,最高紧实度出现在 5 ~ 15 cm 土层,复合体的容重呈现随土层深度增加而增加的趋势,

而孔隙度则随土层深度的增加呈逐渐降低的趋势。虽然以上物理特性有变化趋势,但在显著水平为 $P<0.05$ 的条件下这种差别并不显著。各土层含水率均超过了 25%,土壤深层的蓄水性略高于表层和亚表层土壤,但整体差别不大。

由于每个取样点的含根量相差比较大,所以将每个取样点的含根量分别表示出来。各取样点不同土层深度的含根量如表 4 所示。

表3 取样点不同土层深度的复合体紧实度、容重、含水率和孔隙度

土层深度/cm	紧实度/MPa	容重/(g·cm ⁻³)	含水率/%	孔隙度/%
0~5	1.540±0.474 ^a	1.291±0.149 ^a	25.373±1.989 ^a	51.276±5.634 ^a
5~10	1.771±0.453 ^a	1.374±0.121 ^a	26.082±4.248 ^a	48.146±4.550 ^a
10~15	1.701±0.527 ^a	1.382±0.162 ^a	27.842±5.118 ^a	47.847±6.098 ^a
15~20	1.508±0.328 ^a	1.429±0.177 ^a	27.243±6.190 ^a	46.063±6.665 ^a

注:采用 Duncan 比较法进行多重比较,同一列数值后不同字母表明在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

表4 取样点不同土层深度的含根量

Tab.4 Root contents in different soil depths of sampling plots				mg/cm ³
土层深度/cm	取样点1	取样点2	取样点3	
0~5	8.129±0.336 ^b	7.392±0.330 ^a	7.188±0.253 ^a	
5~10	9.821±0.819 ^a	3.283±0.259 ^b	0.800±0.059 ^b	
10~15	1.842±0.224 ^c	0.863±0.112 ^c	0.304±0.041 ^c	
15~20	0.696±0.418 ^c	0.425±0.189 ^c	0.121±0.018 ^c	

可见不同深度范围的含根量具有显著性差异,根系主要分布在0~10 cm深度的土层中,其中0~5 cm深度内含根量约占总含根量55.57%,5~10 cm土层含根量约占总含根量34.03%,10~15 cm土层含根量约占总含根量7.36%,当土壤深度大于15 cm时,根系较少。表明在0~20 cm土层内均形成了土壤-根系复合体结构,但这种复合体结构的根

系分布并不均匀,由于在土壤环境较好的情况下,羊草根系主要分布在5~15 cm深的土层中^[17],而0~5 cm的浅层土壤分布较少,这说明退化草地上根系有向浅层聚集的趋势。在0~10 cm左右的土层内根系更加密集,相对于浅层土壤和深层土壤,根系与土壤的结合更加紧密,也正是由于根系主要在土壤的亚表层聚集,草地土壤的紧实度呈现出先增大后减小的趋势,复合体的存在进一步加剧了土壤在亚表层的板结。

2.2 复合体结构的基本力学特性

抗剪强度、无侧限抗压强度和回弹模量是反映复合体结构基本力学特性的参数,退化草地原状复合体试样的抗剪强度与垂直压力关系曲线如图2所示,无侧限抗压强度试验中的轴向应力与轴向应变关系如图3所示。

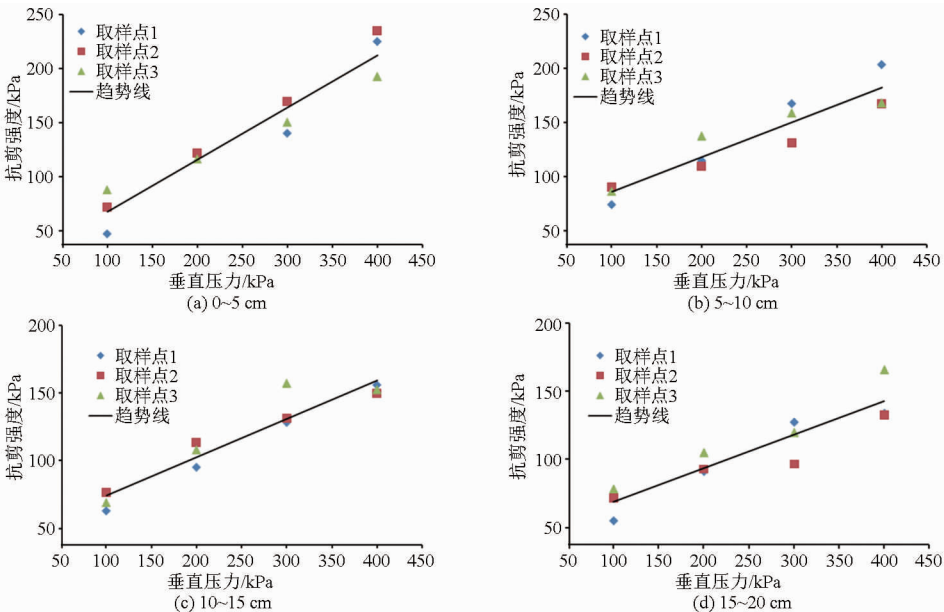


图2 抗剪强度与垂直压力关系
Fig.2 Relationship curves of shear strength and vertical pressure

从图2中可以看出,复合体抗剪强度满足莫尔-库仑定律,即满足关系

$$\tau = \sigma' \tan \varphi + c$$

(2)

式中 σ' ——法向应力, kPa
 φ ——土粒与土粒、土粒与根系之间的综合内摩擦角, (°)

c ——土粒与土粒、土粒与根系之间的黏聚力, kPa
曲线的斜率为内摩擦角的正切值,曲线在纵坐标上的截距为黏聚力。
在图3中,对轴向应力与轴向应变数据进行拟合,绘制出的各曲线无明显峰值,故取轴向应变为

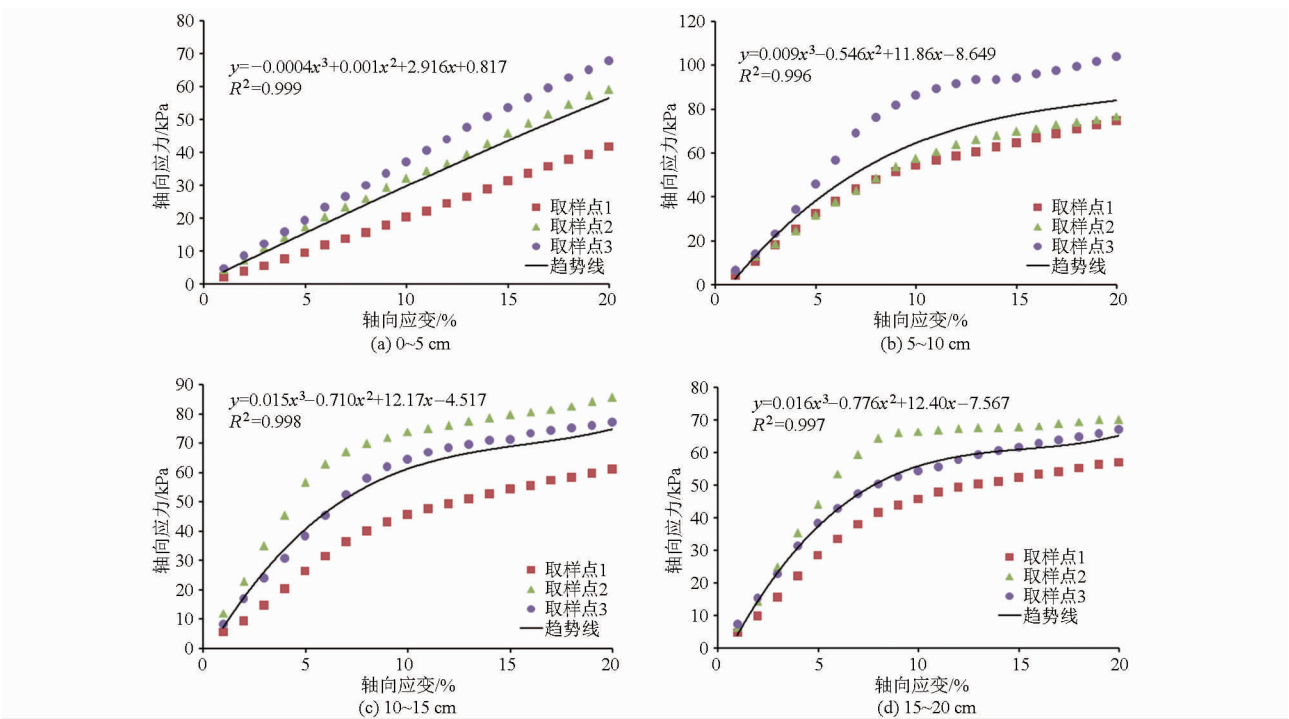


图 3 轴向应力与轴向应变关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of axial stress and axial strain

15% 时对应的轴向应力作为无侧限抗压强度^[14]。

各土层复合体的内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度如表 5 所示。

表 5 各土层复合体内摩擦角、黏聚力和无侧限抗压强度			
抗压强度			
Tab. 5 Internal friction angle, cohesion and unconfined compressive strength of composite in different soil depths			
土层深度/ cm	内摩擦角 均值/(°)	黏聚力均 值/kPa	无侧限抗压强度/ kPa
0 ~ 5	25. 060 ^a	23. 459 ^a	43. 593 ± 11. 248 ^b
5 ~ 10	17. 581 ^{ab}	54. 362 ^a	76. 227 ± 15. 784 ^a
10 ~ 15	15. 772 ^b	46. 046 ^a	68. 469 ± 12. 979 ^a
15 ~ 20	13. 770 ^b	44. 814 ^a	60. 711 ± 7. 805 ^{ab}

在耕作部件与土壤根系复合体结构的作用过程中,复合体的抗剪强度反映了其抵抗耕作部件剪切破坏的能力,无侧限抗压强度反映了其抵抗压缩变形的能力,内摩擦角反映了复合体内部之间的摩擦阻力,黏聚力反映了复合体内部之间的粘结能力。表 5 的数据显示,复合体的内摩擦角在 13°~26°之间,且随土层深度增加呈减小的趋势,在 0~5 cm 范围内的内摩擦角与 10 cm 深度以下土壤的内摩擦角存在显著性差异,但在 5~20 cm 范围内内摩擦角的差异在 $P < 0.05$ 显著性水平下并不显著;黏聚力主要在 23~55 kPa 范围内,无侧限抗压强度在 43~77 kPa 范围内,黏聚力和无侧限抗压强度均随着土层深度增加呈先增加后减小的趋势,峰值在 5~15 cm 范围内。虽然黏聚力随深度的变化无显著性差异,

但变化的趋势与紧实度随深度的变化规律一致,容重在此范围内也达到较高的值,结合根系的分布情况,可以推断根系在土壤中的穿插增加了土壤的黏聚力,这一点也反映在复合体结构的无侧限抗压强度的变化上,5~15 cm 深度范围内的无侧限抗压强度与 0~5 cm 相比具有显著性差异,根系的存在可提高复合体结构抵抗压缩变形的能力。

回弹模量反映了复合体在外界垂直压力作用下产生的抵抗竖向变形能力,在相同垂直压力下,回弹模量越高,载荷方向上的形变越小,抵抗变形的能力越强,复合体结构在各级压力下的回弹模量和计算回弹模量如表 6 所示。

从表 6 中可以看出,在 25~50 kPa 压力下复合体回弹模量随土层深度的增加呈先减小后增加的趋势,在 100~200 kPa 压力下复合体回弹模量随土层深度的增加呈先增加后减小然后再增加的趋势。从计算回弹模量来看,复合体回弹模量在 12~18 MPa 之间,且随土层深度的增加呈先减小后增加的趋势,在 0~10 cm 内最高,说明复合体结构在 0~10 cm 范围内的受载形变量与 10~20 cm 相比会小一些,抵抗变形的能力相对强一些,而在 0~10 cm 土层内的含根量最大,说明根系在土壤中穿插长期对土壤起到一定的牵扯和锚固的作用,使得回弹模量增加,抵抗变形的能力增强。

总体上来看,退化草地不同深度下原状复合体的抗剪强度、无侧限抗压强度和回弹模量随着土层深度的不同而发生改变,这些变化与根系的分布情

表 6 不同压力下的回弹模量和计算回弹模量

Tab.6 Resilience modulus under different pressures and calculated resilience modulus					MPa
土层深度/cm	压力/kPa				计算回弹模量
	25	50	100	200	
0 ~ 5	35.475 ± 0.001	22.740 ± 1.672	17.055 ± 0.965	17.168 ± 2.778	17.093 ± 2.640 ^a
5 ~ 10	27.789 ± 7.169	20.915 ± 6.565	19.221 ± 3.034	19.548 ± 2.927	15.526 ± 2.602 ^{ab}
10 ~ 15	21.876 ± 4.464	17.719 ± 4.604	13.359 ± 2.206	13.350 ± 2.119	12.473 ± 1.964 ^b
15 ~ 20	23.735 ± 8.481	21.000 ± 2.050	16.553 ± 3.681	15.442 ± 1.538	14.622 ± 2.588 ^{ab}

况存在关联,也与复合体结构紧实度、土壤容重的变化有关,同时,复合体的含水率也对复合体的力学特性产生影响。

3 复合体力学特性影响因素分析

3.1 影响因素的极差分析与方差分析

将内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度和计算回弹模量作为试验指标,容重、含水率和含根量作为

3 个影响因素并设定 2 个水平(表 1),得到正交试验结果与极差分析如表 7 所示。

通过极差分析发现:对内摩擦角影响的因素主次顺序为: $A > B > BC > AB > AC > C$;对黏聚力影响的因素主次顺序为: $A > AB > B > C > BC > AC$;对无侧限抗压强度影响的因素主次顺序为: $B > AB > A > C > BC > AC$;对回弹模量影响的因素主次顺序为: $A > C > B > BC > AC > AB$ 。

表 7 正交试验结果及极差分析

Tab.7 Orthogonal experiment results and range analysis

试验序号	列号							内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	无侧限 抗压强度/ kPa	回弹模量/ MPa
	A	B	AB	C	AC	BC					
1	1	1	1	1	1	1	1	24.608	0.462	19.819	17.221
2	1	1	1	2	2	2	2	23.701	6.006	32.141	18.421
3	1	2	2	1	1	2	2	20.204	6.648	10.344	17.284
4	1	2	2	2	2	1	1	20.907	14.780	25.491	13.925
5	2	1	2	1	2	1	2	20.405	38.800	79.172	24.381
6	2	1	2	2	1	2	1	20.052	47.120	135.952	22.137
7	2	2	1	1	2	2	1	17.066	16.630	9.975	23.442
8	2	2	1	2	1	1	2	18.675	12.010	11.453	13.562
内摩擦角	T_1	89.420	88.766	84.050	82.283	83.539	84.595	82.633	$T =$ 165.618		
	T_2	76.198	76.852	81.568	83.335	82.079	81.023	82.985			
	极差	13.222	11.914	2.482	1.052	1.460	3.572	0.352			
黏聚力	T_1	27.896	92.388	35.108	62.540	66.240	66.052	78.992	$T =$ 142.456		
	T_2	114.560	50.068	107.348	79.916	76.216	76.404	63.464			
	极差	86.664	42.320	72.240	17.376	9.976	10.352	15.528			
无侧限 抗压强度	T_1	87.795	267.084	73.388	119.310	177.568	135.935	191.237	$T =$ 324.347		
	T_2	236.552	57.263	250.959	205.037	146.779	188.412	133.110			
	极差	148.757	209.821	177.571	85.727	30.789	52.477	58.127			
回弹模量	T_1	66.851	82.160	72.645	82.328	70.204	69.089	76.725	$T =$ 150.373		
	T_2	83.522	68.212	77.728	68.045	80.169	81.283	73.647			
	极差	16.671	13.948	5.083	14.283	9.965	12.194	3.078			

注: AB、AC、BC 分别表示因素 A 和因素 B、因素 A 和因素 C、因素 B 和因素 C 之间的交互作用;T 表示各指标值的列和,T₁ 和 T₂ 分别代表 2 个水平对应的列和。

以空白列作为误差列对正交试验进行方差分析,结果如表 8 所示。

从方差分析结果可以看出,各因素对各指标的影响与极差分析中各因素影响的主次顺序趋势一致。复合体容重和含水率对内摩擦角的影响显著,二者之间的交互作用对内摩擦角有较大影响;含水率与含根量的交互作用对内摩擦角有较大影响;含

根量对内摩擦角基本没有影响。复合体容重与含水率的交互作用对黏聚力具有显著影响;含水率对黏聚力有显著影响;其余因素从统计上看对黏聚力影响不大。复合体含水率和复合体容重与含水率交互作用对无侧限抗压强度具有显著影响,复合体容重对无侧限抗压强度有影响,含根量对无侧限抗压强度有一定影响,其余因素从统计上看对无侧限抗压

表 8 正交试验方差分析

Tab. 8 Variance analysis of orthogonal test

指标	来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	显著性 <i>P</i>
内摩擦角	<i>A</i>	21. 853	1	21. 853	1 410. 941	<0. 05
	<i>B</i>	17. 743	1	17. 743	1 145. 592	<0. 05
	<i>AB</i>	0. 770	1	0. 770	49. 719	0. 05 ~ 0. 1
	<i>C</i>	0. 138	1	0. 138	8. 932	≥0. 2
	<i>AC</i>	0. 266	1	0. 266	17. 203	0. 1 ~ 0. 2
	<i>BC</i>	1. 595	1	1. 595	102. 976	0. 05 ~ 0. 1
	<i>e</i>	0. 015	1	0. 015		
	和	42. 380	7	6. 054	$F_{0.4}(1,1)=1.89,F_{0.3}(1,1)=3.85$ $F_{0.2}(1,1)=9.50,F_{0.1}(1,1)=39.86$ $F_{0.05}(1,1)=161.40,F_{0.01}(1,1)=4052$	
黏聚力	<i>A</i>	938. 831	1	938. 831	50. 317	<0. 05
	<i>B</i>	223. 873	1	223. 873	11. 998	<0. 05
	<i>AB</i>	652. 327	1	652. 327	34. 961	<0. 05
	<i>C</i>	37. 741	1	37. 741	2. 023	≥0. 2
	<i>AC</i>	12. 440	1	12. 440	0. 667	≥0. 2
	<i>BC</i>	13. 395	1	13. 395	0. 718	≥0. 2
	<i>e</i>	30. 140	1	30. 140		
	<i>E</i>	55. 975	3	18. 658		
无侧限 抗压强度					$F_{0.4}(1,3)=0.96,F_{0.3}(1,3)=1.56$ $F_{0.2}(1,3)=2.68,F_{0.1}(1,3)=5.54$ $F_{0.05}(1,3)=10.13,F_{0.01}(1,3)=34.12$	
	和	1 908. 747	7	272. 678		
	<i>A</i>	2 766. 081	1	2 766. 081	9. 376	0. 05 ~ 0. 1
	<i>B</i>	5 503. 107	1	5 503. 107	18. 653	<0. 05
	<i>AB</i>	3 941. 433	1	3 941. 433	13. 360	<0. 05
	<i>C</i>	918. 640	1	918. 640	3. 114	0. 1 ~ 0. 2
	<i>AC</i>	118. 495	1	118. 495	0. 402	≥0. 2
	<i>BC</i>	344. 229	1	344. 229	1. 167	≥0. 2
回弹模量	<i>e</i>	422. 344	1	422. 344		
	<i>E</i>	885. 068	3	295. 023		
					$F_{0.4}(1,3)=0.96,F_{0.3}(1,3)=1.56$ $F_{0.2}(1,3)=2.68,F_{0.1}(1,3)=5.54$ $F_{0.05}(1,3)=10.13,F_{0.01}(1,3)=34.12$	
	和	14 014. 330	7	2 002. 047		
	<i>A</i>	34. 742	1	34. 742	29. 341	0. 1 ~ 0. 2
	<i>B</i>	24. 317	1	24. 317	20. 537	0. 1 ~ 0. 2
	<i>AB</i>	3. 230	1	3. 230	2. 728	≥0. 2
	<i>C</i>	25. 500	1	25. 500	21. 536	0. 1 ~ 0. 2
	<i>AC</i>	12. 414	1	12. 414	10. 484	0. 1 ~ 0. 2
	<i>BC</i>	18. 587	1	18. 587	15. 697	0. 1 ~ 0. 2
	<i>e</i>	1. 184	1	1. 184		
					$F_{0.4}(1,1)=1.89,F_{0.3}(1,1)=3.85$ $F_{0.2}(1,1)=9.50,F_{0.1}(1,1)=39.86$ $F_{0.05}(1,1)=161.40,F_{0.01}(1,1)=4052$	
	和	119. 973	7	17. 139		

注： $P<0.05$ 说明影响显著； $0.05\leq P<0.1$ 说明有影响； $0.1\leq P<0.2$ 说明有一定影响； $P\geq 0.2$ 说明无影响^[18]，*e* 表示误差，*E* 表示修正误差。

强度没有影响。复合体容重、含根量、含水率、含水率与含根量的交互作用以及复合体容重和含根量的交互作用对回弹模量具有一定的影响，复合体容重与含水率的交互作用从统计上看对回弹模量没有影响。

可以看出，复合体容重对内摩擦角、黏聚力和回弹模量的影响最大，含水率对无侧限抗压强度的影响最大，含根量往往与前 2 个因素交互在一起对复合体力学特性产生影响。

3.2 容重、含水率和含根量对复合体抗剪强度的影响

当复合体容重、含水率和含根量发生变化时，其抗剪强度、内摩擦角和黏聚力如表 9 所示。

表 9 不同容重、含水率和含根量条件下的抗剪特性

试验序号	容重/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	含根量/ (mg·cm ⁻³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	抗剪强度/kPa			
						100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
1	1.2	16.52	0	24.608	0.462	46.262	92.063	137.863	183.664
2	1.2	16.52	10	23.701	6.006	49.905	93.804	137.703	181.602
3	1.2	24.68	0	20.204	6.648	43.449	80.250	117.050	153.851
4	1.2	24.68	10	20.907	14.780	52.980	91.181	129.381	167.581
5	1.5	16.52	0	20.405	38.800	76.000	113.199	150.399	187.598
6	1.5	16.52	10	20.052	47.120	83.620	120.120	156.620	193.119
7	1.5	24.68	0	17.066	16.630	47.329	78.028	108.727	139.426
8	1.5	24.68	10	18.675	12.010	45.810	79.609	113.409	147.208

从表 9 可以看出,复合体容重、含水率和含根量的变化使复合体的抗剪强度、内摩擦角和黏聚力均发生改变。

当容重和含水率条件相同,含根量由 0 mg/cm³ 增加至 10 mg/cm³ 时,复合体的抗剪强度随着含根量的增加表现出总体增加的趋势。进一步分析发现,从统计上看无论在何种土壤容重和含水率条件下,仅含根量发生变化,复合体内摩擦角基本不变,黏聚力发生的改变反映在土壤的抗剪强度上则差别不大。当容重和含根量条件相同,含水率由 16.52% 增加至 24.68% 时,复合体的抗剪强度随着含水率的增加而减少。随着含水率的增加,内摩擦角呈减小的趋势,但内摩擦角减小的幅度差别不大。在低容重条件下,复合体黏聚力随含水率的增加而增加,但在高容重条件下,黏聚力随含水率的增加而减小。当含水率和含根量相同,容重由 1.2 g/cm³ 增加至 1.5 g/cm³ 时,复合体的抗剪强度呈先增加后减小的趋势,在低含水率条件下抗剪强度随容重的增加表现为增加的趋势,在高含水率条件下抗剪强度随容重的增加表现为减小的趋势,内摩擦角随容重的增加而减小,黏聚力在低含水率条件下随容重的增加呈增加的趋势,但在高含水率且无根的条件下随容重增加而增加,在有根的情况下随容重的增加而减小。可见,在高坚实度的退化草地上,当含水率较高时,复合体结构内部的复合体单元之间的内摩擦阻力和相互之间的粘结能力较低含水率时要低;此外,不管含根量多少,低容重低含水率条件下的复合体内摩擦角最大,高容重、高含水率条件下的复合体内摩擦角最小;而复合体结构的抗剪强度在高容重和低含水率条件下达到最大,因此在高含水率条件下进行机械作业更容易打破这种结构。

3.3 容重、含水率和含根量对复合体无侧限抗压强度的影响

当复合体容重、含水率和含根量发生变化时,复合体的无侧限抗压强度如表 10 所示。

表 10 不同容重、含水率和含根量条件下的无侧限抗压强度

试验序号	容重/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	含根量/ (mg·cm ⁻³)	抗压强度/ kPa
1	1.2	16.52	0	19.819
2	1.2	16.52	10	32.141
3	1.2	24.68	0	10.344
4	1.2	24.68	10	25.491
5	1.5	16.52	0	79.172
6	1.5	16.52	10	135.952
7	1.5	24.68	0	9.975
8	1.5	24.68	10	11.453

从表 10 可以看出,复合体容重、含水率和含根量的变化使复合体的无侧限抗压强度发生变化。

可以看出,根系的存在可以增加土壤的无侧限抗压强度。当容重和含水率条件相同,含根量由 0 mg/cm³ 增加至 10 mg/cm³ 时,复合体的无侧限抗压强度随含根量的增加呈增加趋势。进一步分析发现,无论在何种容重和含根量条件下,无侧限抗压强度随着含水率的增加而减小,但减小的幅度随着容重和含根量的变化而不同。当含水率和含根量相同,容重由 1.2 g/cm³ 增加至 1.5 g/cm³ 时,复合体的无侧限抗压强度随容重的增加而增大,但当含水率超过一定值后,无侧限抗压强度随着容重的增加而减小,而且复合体的无侧限抗压强度在高容重低含水率时达到最大,高容重高含水率时的无侧限抗压强度达到最小。因此,对于高坚实度草地来说,其板结性土层形成的复合体结构在含水率较高时表现出较小的无侧限抗压强度。

3.4 容重、含水率和含根量对复合体回弹模量的影响

当复合体容重、含水率和含根量发生变化时,复合体的计算回弹模量如表 11 所示。

从表 11 可以看出,复合体容重、含水率和含根量均对复合体的回弹模量有一定的影响,且随着上

表 11 不同容重、含水率和含根量条件下的计算回弹模量
Tab.11 Calculated resilience modulus under different levels of density, moisture content and root content

试验序号	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	含根量/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$)	回弹模量/ MPa
1	1.2	16.52	0	17.221
2	1.2	16.52	10	18.421
3	1.2	24.68	0	17.284
4	1.2	24.68	10	13.925
5	1.5	16.52	0	24.381
6	1.5	16.52	10	22.137
7	1.5	24.68	0	23.442
8	1.5	24.68	10	13.562

述因素变化,回弹模量的变化也表现出不同的变化趋势。当容重和含水率相同时,含根量由 0 mg/cm^3 增加至 10 mg/cm^3 ,回弹模量随含根量的增加在低容重低含水率条件下呈增加趋势,在低容重高含水率条件下呈减小的趋势,在高容重时无论在低含水率还是高含水率条件下均呈减小的趋势。可以看出,复合体的回弹模量在各含根量变化所带来的影响中表现出一定的差异,造成这种差异的原因可能与含水率、容重和含根量的综合作用有关,仍需进一步的研究。当含水率和含根量相同,容重由 1.2 g/cm^3 增加至 1.5 g/cm^3 时,总体上看回弹模量呈增加的趋势,但当含水率和含根量由低变高时,回弹模量随容重增加的趋势也受到影响;当容重和含根量相同,含水率由 16.52% 增加至 24.68% 时,回弹模量随含水率的增加呈减小的趋势。因此,容重、含水率和含根量均对复合体的回弹模量具有一定的影响且较为复杂,试样的回弹模量在不同因素水平下的变化趋势也表现出一定差异,但在高含水率条件下,复合体的回弹模量均达到最小,并且有根条件下的回弹模量均比无根条件下的低。

4 讨论

现有研究中存在对复合体力学特性方面的研究,但大部分是直立根系或添加纤维和其他基质形成的复合体结构,所表现出的力学特性各有不同。本研究发现容重、含水率和含根量均对复合体力学特性产生影响。

杨亚川等^[5]的研究指出,复合体的抗剪强度与垂直压力符合库仑定律,抗剪强度随含根量增加而增大,随含水率的增大而减小,且内摩擦角与含根量关系不大,这与本研究结果相似。姚军等^[19]和陈红星等^[20]也发现土壤抗剪强度随着含水量的增加呈降低趋势。郑子成等^[21]研究指出含根量、根长和根系体积等根系参数与土壤抗剪强度呈极显著正相关

关系,含水率、容重和玉米根系对土壤抗剪强度具有较大影响。YILMAZ^[22]发现添加纤维和粉煤灰均可以增加土壤的无侧限抗压强度,且纤维的类型、长度和含量均会对无侧限抗压强度产生影响,KUMAR 等^[23]的研究也有相同的结果,说明纤维基质的存在可增强复合体的无侧限抗压强度,其含量也与无侧限抗压强度有着密切的联系。MAZARI 等^[24]通过对细粒土样品进行试验发现,回弹模量随着含水率的增加而减少,这也与本研究结果相似。

郑子成等发现在 $0\sim5\text{ cm}$ 土层抗剪强度随土壤含水率增大呈线性增加, $5\sim20\text{ cm}$ 土层的抗剪强度随含水率增加而线性减小,并指出抗剪强度与土壤容重呈极显著线性正相关^[21],李小昱等则指出存在临界含水率,土壤抗压强度在临界含水率两侧表现出不同的变化趋势,在土壤含水率一定的情况下,抗压强度随着土壤容重的增加呈指数曲线增大^[25],这与本研究结果有所不同。造成上述不同的一个原因可能是根系类别、茎级、分布方式和含量等参数不同使得与土壤粘结过程中产生的影响不同,根系与土壤粘结在一起增加土壤的抗剪和抗压能力,随着容重的增加,抗剪和抗压能力也有所增加,但当含水率增大到一定程度后,土颗粒周围的水膜厚度增大,颗粒和基质之间的摩擦力降低,同时水分使得某些有胶结作用的物质破坏,从而导致抗剪和抗压能力降低;另一个原因也可能是根系与土壤形成的团聚体不同造成的,团聚体稳定性不同导致所表现的力学特性不同^[26]。有研究表明压实度越大土基回弹模量越大,回弹模量随含水率的增大而减小,并且存在最佳含水率,在最佳含水率两侧回弹模量变化的程度有所不同^[27-28],同时回弹模量与样品的容重有很大关系,当容重比较低时,回弹模量增加幅度较小,材料的容重越大,回弹模量越大^[29],而本研究发现容重、含水率和含根量对复合体的回弹模量的影响较为复杂,回弹模量随各因素的变化表现出一定的差异,其原因可能与根系参数有关,也可能与团聚体的稳定性有关,仍需要进一步的研究。

土壤耕作部件与退化草地的土壤-根系复合体结构相互作用时,其运动及受力形式符合纯切削模型理论^[30],与无根条件下的土壤相比,复合体的抗剪强度和无侧限抗压强度均有增强,在相同条件下反映在耕作部件上的阻力和功耗也会提高,因此在设计和选用草地土壤耕作部件时应尽量以窄齿类的部件为主,尽量减小其厚度和作业时的接触面积,以克服阻力增加所带来的影响,同时还应考虑回弹特性的影响,减少对土层的扰动与翻垡破坏,从而避免作业后对草地土壤造成风蚀或水蚀。本研究发现退

化草地因复合体的存在,在0~20 cm土层深度范围内的紧实度和容重都比较高,土壤环境不利于牧草种子的萌发和生长,因此在改良草地构建种床和肥床时应在实现浅层开沟的基础上具有底层疏松功能。另外,本研究还发现对于高坚实度的退化草地,在含水率较高的情况下,复合体的内摩擦角、黏聚力、抗剪强度、无侧限抗压强度和回弹模量相对低含水率时都比较低,说明在此条件下更容易破坏这种复合体结构和板结性土层,耕作部件入土的阻力较小,作业功耗也会相应降低,因此,可以选择在冬雪消融和雨水旺盛的牧草返青期进行作业。

5 结论

(1)退化草地在0~10 cm左右的土层深度范围内形成了土壤-根系复合体结构,根系分布的不同对整体的紧实度、容重以及孔隙度都造成了一定程度的影响,同时使羊草的根系有向浅层聚集的趋势,进一步加剧了土壤亚表层板结。

(2)复合体的力学特性随土层深度的增加不全

都表现出显著性差异($P < 0.05$),各力学特性的峰值均出现在根系分布较为密集的土层(0~15 cm),且部分力学特性在不同深度土层之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

(3)容重、含水率和含根量均对复合体的力学特性产生了影响,各影响因素有主次顺序且存在交互作用。容重对内摩擦角、黏聚力和回弹模量的影响最大,含水率对无侧限抗压强度的影响最大;容重和含水率是内摩擦角的显著性影响因素($P < 0.05$),含水率是黏聚力和无侧限抗压强度的显著性影响因素($P < 0.05$)。

(4)退化草地形成的土壤-根系复合体结构,其抗剪强度符合库伦定律,根系的存在可增加其抗剪强度和无侧限抗压强度,并使回弹模量发生改变。作业时应尽量选用窄齿类耕作部件进行退化草地机械化改良作业,选择高含水率条件下进行作业更容易打破复合体结构,因此,可以选择在冬雪消融和雨水旺盛的牧草返青期进行作业。

参 考 文 献

- 1 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 grassland (*leymus-chinensis*) by soil-gashing and root-cutting [D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 2 ALVAREZ R, STEINBACH H S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1): 1-15.
- 3 MUELLER L, KAY B D, DEEN B, et al. Visual assessment of soil structure: Part II. implications of tillage, rotation and traffic on sites in Canada, China and Germany [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(1): 188-196.
- 4 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)
- 5 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J].中国农业大学学报,1996,2(1):31-38.
YANG Yachuan, MO Yongjing, WANG Zhifang, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite [J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 2(1): 31-38. (in Chinese)
- 6 HEJAZI S M, SHEIKHZADEH M, ABTAHI S M, et al. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 100-116.
- 7 姚喜军.四种植物根系提高土体抗剪强度有效性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
YAO Xijun. Study on the availability of four kinds of plant roots to improve shear strength [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 8 万利,王震洪,杨成波.生态修复区不同植物群落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)
- 9 章春,朱义龙.土壤肥料应用与管理[M].合肥:合肥工业大学出版社,2013.
- 10 贾慎修.草地学[M].2版.北京:中国农业出版社,2001.
- 11 KLUTE A. Methods of soil analysis part I—physical and mineralogical methods[M]. 2nd ed. Madison, WI: SSSA, 1986.
- 12 NY/T 1121.4-2006 土壤检测第4部分:土壤容重的测定[S].2006.
- 13 NY/T 1121.3-2006 土壤检测第3部分:土壤机械组成的测定[S].2006.
- 14 吕英华,秦双月.测土与施肥[M].北京:中国农业出版社,2002.
- 15 GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S].1999.
- 16 ASAE S358.2 DEC1988 (R2008) Moisture measurement—forages[S].2008.
- 17 杨允菲,郑慧莹,李建东.松嫩平原两个趋异类型羊草无性系种群特征的比较研究[J].植物学报,1997,39(11):1058-1064.

YANG Yunfei, ZHENG Huiying, LI Jiandong. Comparitive study on characters of two divergence types of the clone population leymus chinensis in the Songnen Plain of China [J]. Acta Botanica Sinica, 1997, 39(11): 1058 – 1064. (in Chinese)

18 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社,2012.

19 姚军,吴发启,宋娟丽,等. 黄土高原沟壑区坡耕地表层土壤抗剪强度影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3): 236 – 239.

YAO Jun, WU Faqi, SONG Juanli, et al. Analysis of influence factors on the shearing strength of the topsoil of sloped farmland of gully regions in the Loess Plateau area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 236 – 239. (in Chinese)

20 陈红星,李法虎,郝仕玲,等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(2):22 – 25.

CHEN Hongxing, LI Fahu, HAO Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2):22 – 25. (in Chinese)

21 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)

22 YILMAZ Y. Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil [J]. Engineering Geology, 2015, 188: 168 – 177.

23 KUMAR A, WALIA B S, MOHAN J. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(10): 1063 – 1068.

24 MAZARI M, NAVARRO E, ABDALLAH I, et al. Comparison of numerical and experimental responses of pavement systems using various resilient modulus models [J]. Soils and Foundations, 2014, 54(1): 36 – 44.

25 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,2011,27(5):19 – 21.

LI Xiaoyu, LEI Tingwu, WANG Wei. Experimental research on unconfined compression strength of soil [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):19 – 21. (in Chinese)

26 FATTETA M, FUB Y, GHESTEMC M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength [J]. CATENA, 2011, 87(1): 60 – 69.

27 赵树德. 土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2001.

28 毛雪松,侯仲杰,王威. 基于含水量和冻融循环的重塑土回弹模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2): 3585 – 3590.

MAO Xuesong, HOU Zhongjie, WANG Wei. Experimental research on resilient modulus of remolded soil based on water content and freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Supp. 2): 3585 – 3590. (in Chinese)

29 SIANG A J L M, WIJEYESEKERA D C, MEI L S, et al. Innovative laboratory assessment of the resilient behaviour of materials (rigid, elastic and particulates) [J]. Procedia Engineering, 2013, 53: 156 – 166.

30 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:北京科学技术出版社,1995.

(上接第 78 页)

17 COMEGNA V, DAMIANI P, SOMMELLA A. Scaling the saturated hydraulic conductivity of a vertic ustorthens soil under conventional and minimum tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2000, 54(1): 1 – 9.

18 FLINT L E, SELKER J S. Use of porosity to estimate hydraulic properties of volcanic tuffs[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(5): 561 – 571.

19 MORIN R H. Negative correlation between porosity and hydraulic conductivity in sand-and-gravel aquifers at Cape Cod, Massachusetts, USA[J]. Journal of Hydrology, 2006, 316(1): 43 – 52.

20 NIWAS S, CELIK M. Equation estimation of porosity and hydraulic conductivity of Ruhrtal aquifer in Germany using near surface geophysics[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 84: 77 – 85.

21 LI X, WU P, ZHU D. Effect of foaming pressure on the properties of porous Si₃N₄ ceramic fabricated by a technique combining foaming and pressureless sintering[J]. Scripta Materialia, 2013, 68(11): 877 – 880.

22 LI X, ZHANG L, YIN X. Microstructure and mechanical properties of three porous Si₃N₄ ceramics fabricated by different techniques[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 549: 43 – 49.

23 LI X, WU P, ZHU D. Properties of porous alumina ceramics prepared by technique combining cold-drying and sintering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 41: 437 – 441.

24 蔡耀辉,吴普特,朱德兰,等. 粘土基微孔陶瓷渗灌水器制备与性能优化[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):183 – 188.

CAI Yaohui, WU Pute, ZHU Delan, et al. Preparation and performance optimization of clay-based porous ceramics used in subsurface irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):183 – 188. (in Chinese)