

# 青海柴达木盆地盐湖区 5 种盐生植物根—土复合体 抗剪强度影响因素及评价

余冬梅<sup>1,2</sup>, 祁兆鑫<sup>1,3</sup>, 刘亚斌<sup>1,3</sup>, 杨幼清<sup>1,3</sup>, 李淑霞<sup>1,3</sup>, 胡夏嵩<sup>1,2,4</sup>, 付江涛<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 青海盐湖研究所, 盐湖资源综合高效利用重点实验室, 西宁 810008;

2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青海大学, 西宁 810016)

**摘 要:**为探讨高寒干旱环境下盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素以及复合体抗剪强度特征,选取了位于柴达木盆地西北部的尕斯库勒盐湖区作为研究区,筛选出芦苇、海韭菜、无脉苔草、赖草和洽草 5 种优势盐生植物作为试验供试种,对其进行了室内根—土复合体原状试样直剪试验,分析了复合体容重、含水量、根长密度(RLD)、根重密度(RWD)和根面积比(RAR)5 种因素对根—土复合体抗剪强度影响;在此基础上,采用灰色关联法进一步评价了上述 5 种因素对复合体抗剪强度的影响程度,结果表明:盐生植物根—土复合体粘聚力  $c$  值、摩擦角  $\varphi$  值与影响因素间的灰色关联度容重为 0.740, 0.879, 含水量为 0.698, 0.849, 根重密度为 0.692, 0.609, 根长密度为 0.655, 0.519, 根面积比为 0.631, 0.569; 5 种盐生植物根—土复合体粘聚力  $c$  值与 5 种影响因素容重之间的关系相对较为显著。其中芦苇根系增强土体粘聚力  $c$  值作用相对较为显著,其根系在土体中呈近似垂直状分布,故在试样中根系多数穿过剪切面,即当复合体发生剪切变形时,试样中根系基本均能起到抵抗剪切变形作用。该研究成果对研究区及其周边地区有效防治坡面水土流失、浅层滑坡等地质灾害现象发生具有一定理论研究价值和实际指导意义。

**关键词:**柴达木盆地; 尕斯库勒盐湖区; 盐生植物; 根—土复合体; 灰色关联法

**中图分类号:** S152; S153

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2019)04-0157-09

## Factors Affecting Shear Strength and Contribution Evaluation of Root-Soil Composite Systems of Five Halophytes in the Salt Lake Region of Northwest Qaidam Basin, Qinghai Province

YU Dongmei<sup>1,2</sup>, QI Zhaoxin<sup>1,3</sup>, LIU Yabin<sup>1,3</sup>,

YANG Youqing<sup>1,3</sup>, LI Shuxia<sup>1,3</sup>, HU Xiasong<sup>1,2,4</sup>, FU Jiangtao<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,  
Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Qinghai  
Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining 810008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** To explore the factors which affect shear strength of five halophyte root-soil composite systems and the characteristics of shear strength, the region around the Gasikule Salt in Qaidam Basin was selected as the test site. First, five predominate indigenous plant species such as *Phragmites australis* Trin., *Triglochin maritimum* Linn., *Carex enervis* C. A. Mey., *Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel., *Koeleria cristata* (L.) Pers. were taken as test plants; then indoor direct shear tests were conducted on the rooted soil of the five species to investigate the effects of such factors as Bulk density, moisture content, root length density, root weight density, and root area ratio on the shear strength of rooted soil; finally, based on the above tests, grey correlation method was adopted to further evaluate the degrees of the effects of these factors on the shear strength of rooted soil. The results have testified the grey correlations of cohesion force ( $c$ ) and

收稿日期: 2018-10-15

修回日期: 2018-11-20

资助项目: 国家自然科学基金(41572306); 中国科学院“百人计划”(Y110091025); 青海省自然科学基金(2014-ZJ-906)

第一作者: 余冬梅(1986—), 女, 河南信阳人, 硕士生, 助理研究员, 主要从事地质灾害防治以及环境生态研究。E-mail: ydm2011@isl.ac.cn

通信作者: 胡夏嵩(1965—), 男, 河南开封人, 教授, 主要从事环境岩土工程与地质工程等的教学与研究工作。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

internal friction angel ( $\varphi$ ) with the factors, that is, the correlation of bulk density to  $c$  and  $\varphi$  is 0.740 and 0.879, 0.698 and 0.849 for moisture content, 0.692 and 0.609 for root weight density, 0.655 and 0.519 for root length density, 0.631 and 0.569 for root area ratio; among the five factors, there is a significant correlation between bulk density and shear strength of rooted soil for the five species. *Phragmites australis* root enhancing soil cohesion  $c$  value is relatively significant because the root system is approximately vertical in the soil. Therefore, most of the roots in the sample pass through the shear plane, that is, when the composite shear deformation occurs, the root system in the sample can basically play a role in resisting shear deformation. The results can be significance of preventing water and soil loss and controlling shallow landslides and other natural disasters in the areas with similar geological and climatic conditions.

**Keywords:** Qaidam Basin; Gasikule Salt Lake; halophytes; root-soil system; grey correlation method

盐渍土为地球上分布较为广泛的一种土壤类型,约占陆地总面积  $1/4$ <sup>[1]</sup>。西北内陆区受干旱和半干旱气候条件影响,地表径流严重、淋滤作用微弱,低洼部分广泛发育盐生荒漠、盐生草原,盐碱湖泊广布<sup>[2]</sup>。青海地区分布约为 22 984 km<sup>2</sup> 面积盐渍土,且主要分布于柴达木盆地西部及西宁、平安河湟谷地湟水河南岸山前倾斜平原带<sup>[3]</sup>。柴达木盆地农荒地资源为 29.80 万 hm<sup>2</sup>,现有耕地面积仅为 5.30 万 hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。盐渍土中易溶盐分具有遇水溶解特性,使得盐渍土密度、孔隙度等物理性质及压缩性、抗剪强度等力学性质指标发生变化,致使盐渍土强度显著降低,且因盐分溶解而产生诸如公路路面出现纵向和网状裂缝,不均匀波浪起伏、隆起和沉陷,以及建筑物地基溶陷等现象<sup>[5-7]</sup>,其结果使得在盐渍土地区开展基础工程建设和生态环境保护过程中,受到地面沉降、边坡变形以及因地表生长植物枯竭所造成土地等盐渍化现象发生。诸多研究结果表明,采用生物措施防治可作为盐碱地改良利用有效方法,盐生植物在其生长过程中可实现有效减少地表蒸发,中和土壤碱性和改善土壤结构,防治盐分表聚和提高土壤肥力,其结果产生土壤生产力出现良性循环,达到有效改良盐渍土的目的<sup>[3]</sup>。植物根系在根系—土体系统中起到完成两者耦合作用的重要因子,根系不仅可改良土壤结构性状和促进土粒的团聚<sup>[8]</sup>,且根系在对土体穿插、缠绕、网格和固结过程中与土颗粒表面摩擦力,以及根系与土颗粒间的嵌入作用所产生的咬合力,均具有增加土体抗剪强度的作用<sup>[9]</sup>。有关植物根系在土体中作用的相关研究结果表明,根—土复合体抗剪强度主要与土体类型、粒径、密度、含水量、含盐量、颗粒、矿物、应力等相关因素有关<sup>[9]</sup>;植物根系增加的附加抗剪强度,则主要与根系类型、根系形态结构、根长密度、根表面积密度、根重密度、根面积比、根系抗拉特性、单根杨氏模量等根系特性有关<sup>[10]</sup>。

有关根—土复合体强度及其影响因素,国内外学者开展了相关研究工作。Fu 等<sup>[11]</sup>通过对西宁盆地

柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom.)、霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon* Bunge.) 和白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobr.) 3 种灌木根系结构特征研究结果表明,生长期由 10 个月增至 17 个月时,柠条锦鸡儿和霸王根面积比(RAR)分别由 48.32% 增至 210.25%,0.56% 增至 166.85%;柠条锦鸡儿和霸王根—土复合体粘聚力  $c$  值增加 12.41%~25.22% 和 3.45%~17.33%。张惠忍等<sup>[12]</sup>通过对生长期为 1 a 草本稗草 (*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.) 和狗尾巴 (*Setaria viridis* (L.) Beauv.) 根—土复合体直剪试验结果表明,当根重密度为 5~10 kg/m<sup>3</sup> 时,稗草根系可增强复合体抗剪强度为 19.8%~39.5%,土体干密度和含水量对稗草根—土复合体抗剪强度影响程度相对大于根重密度。Pirnazarov 等<sup>[13]</sup>研究了生长于瑞典斯德哥尔摩 (Stockholm) 地区的 *Picea abies* L. 和 *Pinus sylvestris* L. 两种乔木植物根系对土体最大承载力的影响,结果表明随着根—土复合体试样中的根面积比(RAR)由 0.03% 增至 0.21%,土体粘聚力则由 0.91 kPa 增加至 1.53 kPa。

综上所述,有关对植物根—土复合体抗剪强度影响因素方面的相关研究,更多反映在对含水量、土体干密度、根面积比等这些因素,且主要按照单一因素探讨其对增强土体抗剪强度影响研究;相应地,进行影响因素综合性分析和系统性评价方面尚需进一步开展研究,尤其对青藏高原东北部高寒干旱环境下盐渍土分布地区,有关盐生植物根—土复合体抗剪强度影响方面已有相关研究则相对更为有限。基于上述原因,本项研究较为系统地探讨容重、含水量、根长密度(RLD)、根重密度(RWD)和根面积比(RAR)5 种因素对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响,以及复合体增强土体抗剪强度的贡献评价。该项研究结果对进一步深入开展高寒干旱环境盐生植物增强土体抗剪强度,以及提高边坡浅层土体稳定性作用机理方面,均具有理论研究价值和实际意义。

## 1 研究区概况

尕斯库勒盐湖区位于柴达木盆地西北缘,其地理坐标为东经  $90^{\circ}35'—91^{\circ}07'$ ,北纬  $37^{\circ}57'—38^{\circ}15'$ ,面积约为  $800\text{ km}^2$ ,隶属于青海海西蒙古族藏族自治州茫崖镇。尕斯库勒盐湖区北缘有315国道,西北方向修筑简易公路,区内中部修建有花土沟至切克里克公路和采油区不同等级公路,区内交通条件相对较方便<sup>[14]</sup>。尕斯库勒盐湖区及其周边地区属典型内陆干旱气候,具有气候寒冷、降雨稀少、蒸发强烈、日温差大等特征<sup>[14]</sup>。该区年平均降水量为  $55.34\text{ mm}$ ,降雨多集中在6—7月份,占全年降水量的60%以上;年蒸发量最高为  $2\,856.93\text{ mm}$ ,年蒸发量为降水量的51.6倍,蒸发主要发生在每年7—8月份,占全年蒸发量的57%;年平均气温为  $1.53^{\circ}\text{C}$ ,最高月平均气温为  $13.3^{\circ}\text{C}$ (7—8月份),最低月平均气温为  $-12.1^{\circ}\text{C}$ (1月份),日温差最高为  $29\sim 32^{\circ}\text{C}$ <sup>[15]</sup>。研究区尕斯库勒盐湖区系内流型干旱封闭盐湖,属卤水湖类型,主要以石盐、芒硝沉积为主,卤水水化学类型属硫酸镁亚型<sup>[16]</sup>。

## 2 试验材料及试验方法

### 2.1 试验材料

本研究筛选出适宜于柴达木盆地西北部尕斯库勒盐湖区及其周边气候条件下生长的芦苇(*Phragmites australis* Trin.)、海韭菜(*Triglochin maritimum* Linn.)、无脉苔草(*Carex enervis* C. A. Mey.)、赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)和治草(*Koeleria cristata* (L.) Pers.)5种优势盐生植物。通过对区内5种盐生植物根系生长量指标统计结果可知,海韭菜等4种植物其根系主要集中分布在地表以下0—30 cm深度,芦苇根系为地表以下30 cm深度以上。因此,在野外制取根—土复合体原状试样时,采用剖面挖掘法整体制取直径为40 cm,高为35 cm圆柱状试样,同时在区内未生长植物区域制取相同尺寸不含根系素土圆柱状试样作为试验对照组;然后将根—土复合体和素土原状试样进行切割和削边移入内径为33 cm,高为30 cm试样盆内,并用大号塑料袋将试样盆密封,以有效防治试样中水分散失并及时运回实验室开展相关试验。

### 2.2 试验方法

室内制取5种盐生植物根—土复合体原状试样方法为:对野外研究区所采集的根—土复合体原状试样,由地表向下依次划分为0—10,10—20,20—30 cm 3个不同制样深度层;然后将4个环刀(内径为6.18 cm,高为2 cm)轻扣于试样表面且刃口朝下,轻

敲环刀顶部,待环刀置入试样3/4深度时,再用另一环刀叠置于该环刀上部,轻击上部环刀,使底部环刀全部置于试样中。待同一取样层位4个环刀均置入原状试样土柱后,采用削土刀将环刀处含根层与下层分开,用削土刀削平环刀两端,擦净外壁即可得到制备完毕复合体原状试样;相应地,不含根系素土试样制取方法,按照采集根—土复合体原状试样方式制取。此外,在制取原状环刀试样同时,对5种植物在地表以下0—10,10—20,20—30 cm这3个层位同时制取一定质量土体试样置入铝盒,以测定土体含水量,含水量采用烘干法测试<sup>[17]</sup>。此外,在室内进行直剪试验前,按环刀法<sup>[17]</sup>测定5种盐生植物分别在地表以下3个不同深度层位的根—土复合体容重。

本项研究中,5种盐生植物根—土复合体与素土试样直剪试验,采用法向压力分别为  $P_1=50\text{ kPa}$ ,  $P_2=100\text{ kPa}$ ,  $P_3=200\text{ kPa}$ ,  $P_4=300\text{ kPa}$  共4级加载,剪切速率设定为  $2.4\text{ r/min}$ ,并按《土工试验规程》<sup>[17]</sup>中规定步骤进行直剪试验。待5种复合体剪切试验结束后,即从剪切盒中取出试样,置于土工筛中用清水将复合体中的根系洗净,且对根径、根系数量和根长等生长量指标进行统计。本项研究中,有关根系特征参数根长密度(RLD)、根面积比(RAR)、根重密度(RWD)分别按如下公式计算。

根长密度(RLD)指的是单位体积土体所含根系长度,反映根系在土体中延伸、穿插、交织程度<sup>[18]</sup>,计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$\text{RLD} = \frac{L}{V} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_N}{\frac{\pi d_s^2}{4} h} \quad (1)$$

式中:RLD为根长密度( $\text{cm}/\text{cm}^3$ ); $L$ 为环刀内根系总长度( $\text{cm}$ ); $V$ 为环刀体积( $\text{cm}^3$ ); $N$ 为环刀内第 $N$ 根; $d_s$ 为环刀内径( $\text{cm}$ ),为6.18 cm; $h$ 为环刀高度( $\text{cm}$ ),为2 cm。

根面积比(RAR)指的是在土体剪切面上根系总截面积所占比率<sup>[20]</sup>,计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\text{RAR} = \frac{A_r}{A_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4}}{\frac{\pi d_s^2}{4}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:RAR为根面积比(%); $A_r$ 为根—土复合体试样横截面上所有根系面积之和( $\text{mm}^2$ ); $A_s$ 为根—土复合体试样的横截面积( $\text{mm}^2$ ); $d_i$ 为单根平均根径( $\text{mm}$ ); $d_s$ 为环刀内径( $\text{mm}$ ),为61.8 mm; $n$ 为环刀内的根系数量(根)。

根重密度(RWD)指的是单位土体里面根系干物质总质量,其大小反映根系吸收养分和水分的能力<sup>[22]</sup>,其

大小对复合体抗剪强度有重要影响,计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$\text{RWD}=\frac{m_s}{V}$$

(3)

式中:RWD 为根重密度( $\text{mg}/\text{cm}^3$ ); $m_s$  为复合体内所含干根质量( $\text{mg}$ ); $V$  为复合体体积即环刀体积为  $60\text{ cm}^3$ 。

本项研究中,鉴于海韭菜、芦苇其根系相对较粗,且在土体中多呈近似垂直分布状态,故对这 2 种盐生植物通过计算其根长密度和根面积比,作为制取根—土复合体试样中根系分布定量依据;赖草、无脉苔草、洽草 3 种植物根系相对较为细小,且在土体中多呈水平或倾斜分布状态,故对于这 3 种植物采用根长密度和根重密度作为根—土复合体试样中根系分布定量依据。

3 结果与分析

3.1 盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素分析

研究区芦苇、海韭菜等 5 种盐生植物根—土复合体在其地表以下 3 个不同深度位置处,通过室内直剪试验得到 5 种不同影响因素下复合体抗剪强度指标试验结果。由表 1 可知,随着取样深度增加 5 种盐生植物其复合体容重呈逐渐增大的变化规律,即由  $1.42\text{ g}/\text{cm}^3$  增加至  $1.76\text{ g}/\text{cm}^3$ ,5 种盐生植物根—土复合体粘聚力  $c$  值则表现出逐渐减小的变化特征,即由  $31.90\text{ kPa}$  降至  $14.70\text{ kPa}$ ;地表以下 3 个不同位置处,复合体中土体含水量呈逐渐增加的变化规律,表现为由  $22.32\%$  增至  $28.56\%$ ;相应地,5 种盐生植物的内摩擦角  $\varphi$  值则随着距离地表采样深度增

加,未表现出显著的变化规律。

区内 5 种盐生植物根长密度均随距离地表取样位置深度的增加,表现出呈显著减小变化趋势,即在地表以下 0—10 cm 深度位置处,其根长密度显著大于地表以下 10—20,20—30 cm 两处深度位置,芦苇、海韭菜、无脉苔草、赖草和洽草 5 种盐生植物在地表以下 0—10 cm 深度位置,其根长密度分别为地表以下 10—20 cm 位置处的 1.74,1.76,1.25,1.45,1.35 倍;同时,5 种盐生植物地表以下 0—10 cm 深度位置,其根长密度分别为地表以下 20—30 cm 深度位置的 2.39,3.19,1.67,2.12,2.18 倍。区内无脉苔草、赖草和洽草 3 种盐生植物其根重密度均随距离地表深度位置的增加呈减小变化趋势,表现为在地表以下 0—10 cm 深度位置处其根重密度分别为地表以下 10—20 cm 深度位置处土层的 1.83,3.07,2.26 倍;为地表以下 20—30 cm 深度土层的 2.19,6.09,3.98 倍;地表以下 0—10 cm 深度位置处根重密度显著大于地表以下 10—20 cm 和 20—30 cm 深度位置处。区内芦苇和海韭菜 2 种盐生植物,其根面积比均随距离地表深度位置增加呈逐渐减小的变化规律,且在地表以下 0—10 cm 深度位置处的根面积比,显著大于地表以下 10—20 cm 和 20—30 cm 深度位置处,即芦苇和海韭菜在地表以下 0—10 cm 深度,其根面积比分别为地表以下 10—20 cm 深度位置处的 2.54 倍和 2.32 倍,同时也分别为地表以下 20—30 cm 深度位置的 4.86 倍和 3.906 倍。

表 1 研究区 5 种盐生植物复合体原状试样抗剪强度试验及其影响因素

试样 类型	取样深度 位置/cm	粘聚力 $c$ 值/kPa	内摩擦角 $\varphi$ 值/(°)	影响抗剪强度主要因素				
				容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水量/%	RLD/ ( $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	RAR/%	RWD/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
芦苇根—土复合体	0—10	31.90	31.00	1.66	22.32	0.221	2.055	—
	10—20	27.40	30.00	1.67	26.34	0.157	0.885	—
	20—30	21.50	29.10	1.76	28.56	0.093	0.672	—
海韭菜根—土复合体	0—10	28.50	28.30	1.51	23.14	4.021	1.453	—
	10—20	25.10	27.90	1.56	25.65	2.280	0.572	—
	20—30	20.80	28.21	1.62	27.68	1.260	0.299	—
无脉苔根—土复合体草	0—10	28.60	29.90	1.50	22.32	2.124	—	5.994
	10—20	23.80	30.30	1.54	23.89	1.705	—	3.300
	20—30	19.90	30.70	1.61	27.96	1.270	—	2.736
赖草根—土复合体	0—10	23.90	28.50	1.46	23.36	3.240	—	5.139
	10—20	21.80	27.90	1.53	24.58	2.235	—	1.674
	20—30	19.70	27.00	1.55	28.35	1.525	—	0.844
洽草根—土复合体	0—10	18.90	30.50	1.42	23.65	2.995	—	6.175
	10—20	16.99	30.27	1.45	26.34	2.224	—	2.731
	20—30	14.70	29.02	1.51	28.44	1.374	—	1.551

注:“—”代表未发现,下表同。

3.2 5 种盐生植物复合体抗剪强度指标及其影响因素的回归分析

由图 1 可知,区内芦苇和海韭菜根—土复合体粘聚力  $c$  值与容重之间呈对数函数关系,无脉苔草、赖草和治草复合体粘聚力  $c$  值与容重呈线性关系;5 种盐生植物其复合体粘聚力  $c$  值与含水量均为线性关系,在地表以下 3 个不同深度位置时复合体随着取样深度增加,根—土复合体粘聚力  $c$  值均表现出呈逐渐降低变化趋势;相应地,容重和含水率则呈逐渐增加的变化趋势。

区内芦苇和海韭菜根—土复合体粘聚力  $c$  值与根长密度之间呈对数函数关系,无脉苔草、赖草和治草根—土复合体粘聚力  $c$  值与根长密度呈线性关系,随着根长密度增加,复合体粘聚力  $c$  值亦表现出呈增长趋势,反映出地表以下 0—10 cm 深度位置处根长密度相对较大;相应地,其复合体粘聚力  $c$  值亦表现出相对较大的变化特征,其主要归因于复合体粘聚力  $c$  值由土粒与土粒、土粒与根系间的粘聚力,以及由土粒的剪应力传递至根系所引起的根系剪应力或锚固力<sup>[20]</sup>,已有研究结果表明,根系表面存在的大量根毛现象起到增加根—土间的接触,具有固结和缠绕周围土体的作用<sup>[24]</sup>;同时因为土体粘聚力大小取决于土体颗粒间的胶结作用,由根系分泌的高、低分子量分泌物可作为有机胶结剂,起到增加土体颗粒的结合程度作用<sup>[25]</sup>。因此根长密度愈大,根系分泌的有机胶结剂相应愈多,则复合体粘聚力  $c$  值呈相应愈大的变化趋势。此外,根长密度与内摩擦角  $\varphi$  值未表现出显著性关系。

芦苇和海韭菜根—土复合体粘聚力  $c$  值与根面积比之间均呈对数函数关系,即表现为地表以下 0—10 cm 深度位置处,根面积比显著大于地表以下 10—20 cm 和 20—30 cm 深度处;相应地,芦苇和海韭菜根—土复合体粘聚力  $c$  值亦相对较大,且前者根面积比显著大于后者,故芦苇复合体粘聚力  $c$  值亦大于海韭菜,即芦苇在地表以下 0—10,10—20,20—30 cm 深度位置处,其根面积比为相同深度位置海韭菜根面积比的 0.21,1.55,2.25 倍,地表以下 3 个深度位置芦苇根—土复合体粘聚力  $c$  值,较海韭菜分别增加 9.54%,7.53%,3.15%。区内尽管海韭菜根系数量相对多于芦苇,但这种相对较粗根径在一定程度反映出其在剪切面上的根系横截面积亦相对较大,说明根面积比与根径之间存在密切关系。其中较粗根径芦苇其根系与土体间的接触面积相对增加,使得复合体试样中根系与土体间的粘结力得以增加,其结果使试样的横向约束力及轴向应力得到相应程度地增强<sup>[26]</sup>,其结果使得复合体粘聚力  $c$  值表现出呈逐渐增大的变化规律。芦苇和海韭菜的根面积比均随距离地表以下取样深度的增加,表现为呈幂函数递减的关系(表 2)。

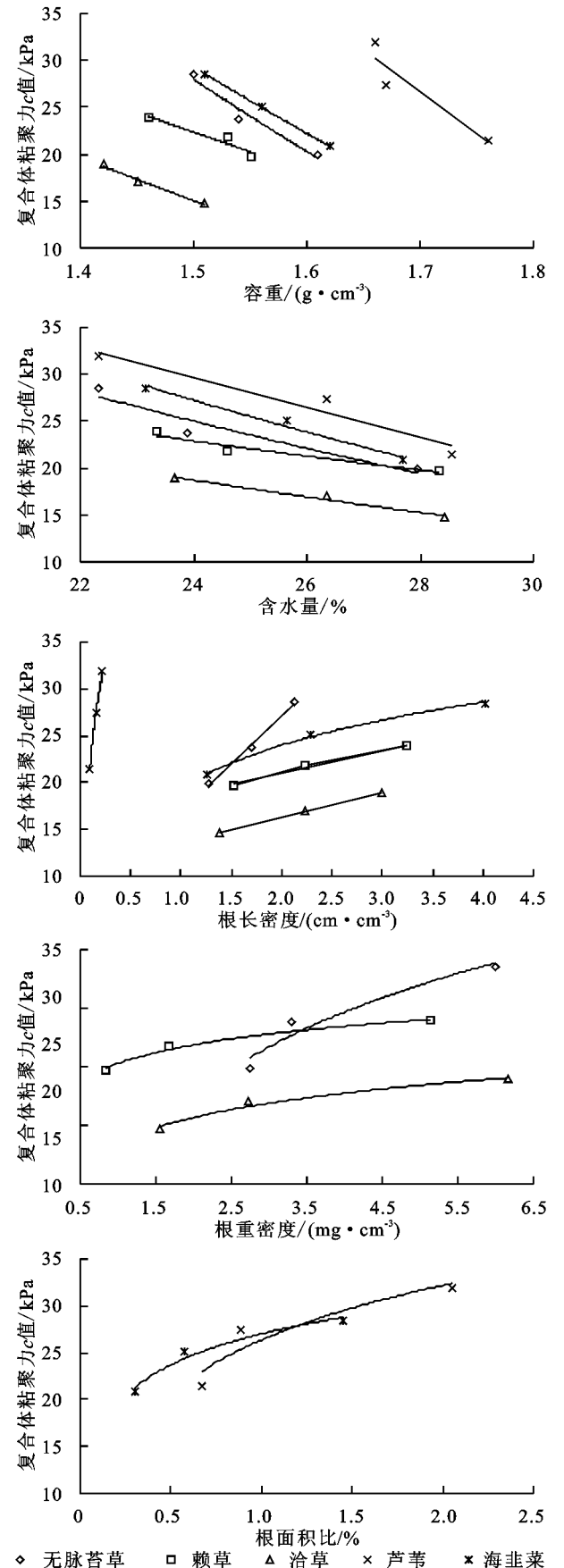


图 1 研究区 5 种盐生植物复合体粘聚力  $c$  值与影响因素之间的关系  
区内无脉苔草、赖草和治草根—土复合体粘聚

力  $c$  值与根重密度之间均呈显著对数函数关系(表 3),即随着根重密度增加,3 种盐生植物其根—土复合体粘聚力  $c$  值亦呈增长趋势。表现在地表以下 0—10 cm 深度位置处,根重密度显著大于地表以下 10—20 cm 和

20—30 cm 深度位置,相应地,其复合体粘聚力  $c$  值亦相对较大,其主要原因在于 3 种草本根系主要集中分布在地表以下 0—10 cm 深度位置,随着根系在土体试样中体积增加,使得根系加筋作用显著增大。

表 2 研究区 2 种植物根—土复合体影响因素和复合体粘聚力  $c$  值的回归关系结果

盐生植物种类		影响因素			
		容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水量/%	RLD/( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	RAR/%
芦苇	拟合方程	$y=11.85\ln x+49.62$	$y=-1.60x+68.14$	$y=11.85\ln x+49.62$	$y=8.37\ln x+26.37$
	拟合优度( $R^2$ )	0.99	0.94	0.99	0.87
海韭菜	拟合方程	$y=-109.60\ln x+73.30$	$y=-1.68x+67.69$	$y=6.64\ln x+19.38$	$y=4.78\ln x+27.02$
	拟合优度( $R^2$ )	0.99	0.98	0.99	0.97

表 3 研究区 3 种根—土复合体植物影响因素和复合体粘聚力  $c$  值的回归关系结果

盐生植物种类		影响因素			
		容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水量/%	RLD/( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	RWD/( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
无脉苔草	拟合方程	$y=-76.45x+142.60$	$y=-1.42x+59.34$	$y=10.17x+6.80$	$y=10.35\ln x+10.32$
	拟合优度( $R^2$ )	0.95	0.90	0.99	0.94
赖草	拟合方程	$y=-42.31x+85.83$	$y=-0.77x+41.49$	$y=2.42x+16.14$	$y=2.28\ln x+20.29$
	拟合优度( $R^2$ )	0.90	0.91	0.99	0.98
洽草	拟合方程	$y=2.59x+11.16$	$y=-0.86x+39.58$	$y=2.59x+11.16$	$y=2.99\ln x+13.60$
	拟合优度( $R^2$ )	0.99	0.98	0.99	0.97

4 盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素贡献评价

4.1 灰色关联分析评价法

植物根—土复合体的抗剪强度作为表征土体和根系力学性质主要指标,其大小直接反映复合体在外力作用下发生剪切变形的难易程度<sup>[27]</sup>。在不同环境中生长的盐生植物,其根—土复合体结构特征和力学强度特性存在差异,这种结构差异性使得同种植物以及不同植物复合体试样抗剪强度均存在显著差异,故植物根—土复合体抗剪强度的差异为土体和根系特性的综合表现,因此对复合体抗剪强度评价应体现出反映多因素的系统观点<sup>[28]</sup>。影响植物根—土复合体原状试样抗剪强度因素较多,本研究采用灰色关联分析法<sup>[29]</sup>,分析容重、含水量、根长密度(RLD)、根重密度(RWD)和根面积比(RAR)5 种因素与抗剪强度之间的相关程度。灰色关联分析<sup>[29]</sup>作为灰色系统理论组成部分,它可对灰色系统中主参考因子与相关比较因子的关系密切程度进行定量描述和比较,表现为关联度愈大,表明比较因子与参考因子的相关性愈强。

本项研究所采用的灰色关联分析的步骤和关联度的计算<sup>[30]</sup>5 种盐生植物根—土复合体粘聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$  值与容重、含水量、根长密度(RLD)、根重密度(RWD)和根面积比(RAR)5 种指标之间的关联度系数。

$$\zeta_{0i}(k)=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k)+\rho\Delta_{\max}}$$

$(k=1,2,\cdots,n;i=0,1,2,\cdots,m)$

4)

$$\Delta_{\max}=\max_i\max_k|x'_0(k)-x'_i(k)|$$
$$\Delta_{\min}=\min_i\min_k|x'_0(k)-x'_i(k)|$$

5)

式中: $\zeta_{0i}(k)$ 为参考数据列与比较数据列每个对应数据之间的关联系数; $\Delta_{0i}$ 为参考数据列中的数据值与比较数据列中对应数据值的绝对差值,即  $\Delta_{0i}(k)=|x'_0(k)-x'_i(k)|$ ; $\Delta_{\min}$ 为绝对差值中的最小值; $\Delta_{\max}$ 为绝对差值中的最大值; $\rho$ 为分辨系数, $\rho\in(0,1)$ ,通常取值为 0.5。

4.2 5 种盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素贡献评价结果

由表 4 可见,区内根系呈垂直分布形式的芦苇和海韭菜根—土复合体粘聚力  $c$  值与影响因素之间的关联度由大至小依次为:容重为 0.740,含水量为 0.698,根长密度为 0.655,根面积比为 0.631;根系呈水平或倾斜状分布的无脉苔草、赖草和洽草的根—土复合体粘聚力  $c$  值与影响因素间的关联度由大至小则依次为:容重为 0.740,含水量为 0.698,根重密度为 0.692,根长密度为 0.655。

灰色关联度法相关研究结果表明灰色关联度愈大,比较数列对参考数列的影响就愈大<sup>[31]</sup>。由表 1 可知,区内 5 种植物根—土复合体中,芦苇在地表以下 0—30 cm 深度位置处容重相对较大,其复合体粘聚力  $c$  值亦表现出相对较大,即在地表以下 0—30 cm 深度位置处容重由大至小依次为:芦苇为  $1.70\text{ g/cm}^3$ ,海韭菜为  $1.56$

g/cm<sup>3</sup>,无脉苔草为 1.55 g/cm<sup>3</sup>,赖草为 1.51 g/cm<sup>3</sup>,治草为 1.46 g/cm<sup>3</sup>;相应地,复合体粘聚力 *c* 值由大至小则依次为:芦苇为 26.93 kPa,海韭菜为 24.8 kPa,无脉苔草为 24.1 kPa,赖草为 21.8 kPa,治草为 16.86 kPa,同

时,由表 4 可知,5 种盐生植物复合体容重对其粘聚力 *c* 值的影响程度相对较为显著,其次,根重密度对 5 种盐生植物复合体粘聚力 *c* 值的影响程度,相对显著于根长密度和根面积比。

表 4 5 种植物根—土复合体粘聚力 *c* 值与影响因素间灰色关联系数及灰色关联度计算结果

试样 类型	取样深度 位置/cm	抗剪强度主要影响因素				
		容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/%	RLD/ (cm·cm <sup>-3</sup> )	RAR/%	RWD/ (mg·cm <sup>-3</sup> )
芦苇根—土复合体	0—10	0.893	0.684	0.333	1.000	—
	10—20	0.840	0.882	0.366	0.525	—
	20—30	0.592	0.592	0.421	0.577	—
海韭菜根—土复合体	0—10	0.931	0.851	0.816	0.717	—
	10—20	0.826	0.810	0.683	0.482	—
	20—30	0.638	0.599	0.583	0.483	—
无脉苔根—土复合体草	0—10	0.915	0.805	0.562	—	0.865
	10—20	0.786	0.840	0.595	—	0.691
	20—30	0.619	0.571	0.606	—	0.724
赖草根—土复合体	0—10	0.855	0.873	0.893	—	0.851
	10—20	0.718	0.728	0.788	—	0.534
	20—30	0.643	0.558	0.665	—	0.496
治草根—土复合体	0—10	0.688	0.668	0.756	—	0.537
	10—20	0.619	0.548	0.959	—	0.840
	20—30	0.544	0.469	0.799	—	0.693
关联度		0.740	0.698	0.655	0.631	0.692

由表 5 可见,根系呈垂直分布的芦苇和海韭菜根—土复合体内摩擦角  $\varphi$  值与影响因素间的灰色关联度由大至小依次为:容重为 0.879,含水量为 0.849,根面积比为 0.569,根长密度为 0.519;根系呈水平或倾斜状分布的无脉苔草、赖草和治草根—土复合体内摩擦角  $\varphi$ 。值与影响因素间的关联度由大至小依次为:容重为 0.879,含水量为 0.849,根重密度为 0.609,根长密度

为 0.519。由上述结果可知,区内 5 种盐生植物其复合体容重对其内摩擦角  $\varphi$  值的影响程度相对较为显著;此外,根系呈近似垂直分布的芦苇和海韭菜复合体,其根面积比对内摩擦角  $\varphi$  值的影响程度相对显著于根长密度;根系呈水平或倾斜状分布的无脉苔草、赖草和治草复合体,其根重密度对内摩擦角  $\varphi$  值影响程度则显著于根长密度。

表 5 5 种植物根—土复合体内摩擦角  $\varphi$  值与影响因素间灰色关联系数及灰色关联度计算结果

试样 类型	取样深度 位置/cm	影响抗剪强度的主要因素				
		容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/%	RLD/ (cm·cm <sup>-3</sup> )	RAR/%	RWD/ (mg·cm <sup>-3</sup> )
芦苇根—土复合体	0—10	0.893	0.684	0.333	1.000	—
	10—20	0.962	0.913	0.337	0.468	—
	20—30	0.886	0.886	0.341	0.436	—
海韭菜根—土复合体	0—10	0.896	0.822	0.845	0.697	—
	10—20	0.972	0.996	0.587	0.432	—
	20—30	0.979	0.889	0.442	0.382	—
无脉苔根—土复合体草	0—10	0.808	0.721	0.520	—	0.987
	10—20	0.822	0.771	0.461	—	0.516
	20—30	0.863	0.977	0.412	—	0.464
赖草根—土复合体	0—10	0.841	0.824	0.807	—	0.845
	10—20	0.939	0.924	0.579	—	0.429
	20—30	0.980	0.796	0.490	—	0.392
治草根—土复合体	0—10	0.728	0.752	0.664	—	0.967
	10—20	0.756	0.898	0.528	—	0.470
	20—30	0.858	0.888	0.443	—	0.408
关联度		0.879	0.849	0.519	0.569	0.609

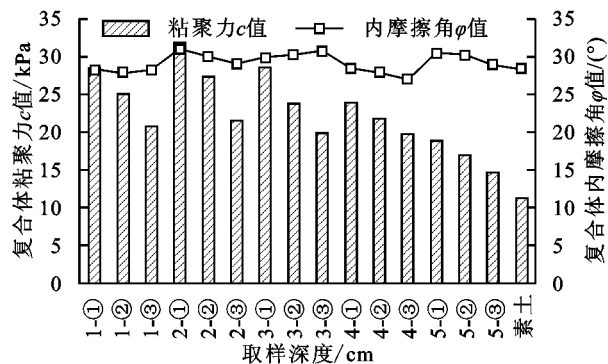
综上所述,区内芦苇、海韭菜等5种盐生植物根—土复合体,其容重对其粘聚力 $c$ 值和内摩擦角 $\varphi$ 值的影响程度均较为显著,且根重密度对复合体粘聚力 $c$ 值和内摩擦角 $\varphi$ 值的影响程度亦较为显著。另外,与本项研究所得到的结果相类似的研究结果表现在:张晓明等<sup>[28]</sup>通过运用灰色关联法,对重庆缙云山混合林、阔叶林、楠竹林、灌木林和农耕地5种典型植被原状复合体试样抗剪强度影响因素分析结果表明,对复合体粘聚力 $c$ 值影响因素由大至小依次为:干密度、小于0.001 mm黏粒含量、不均匀系数 $C_u$ 、根密度、天然含水量、有机质含量;内摩擦角 $\varphi$ 值的影响由大至小则依次为:不均匀系数 $C_u$ 、小于0.001 mm黏粒含量、天然含水量、干密度、有机质含量、根密度。李想等<sup>[32]</sup>采用灰色关联法分析了沈阳天柱山针阔混交林、灌木林、园地、坡耕地、荒地5种不同类型的试验样地,测得土壤抗剪强度指标、容重、含水率、干密度、总孔隙度、土壤团聚体MWD值、粉/黏粒值,采用灰色关联法分析了影响土壤抗剪强度的主要因素,其结果表明影响复合体粘聚力 $c$ 值与复合体容重之间的关联度相对较为显著。

#### 4.3 5种盐生植物根系增强土体抗剪强度效应

图2为区内芦苇、海韭菜等5种盐生植物根—土复合体和素土试样的粘聚力 $c$ 值和内摩擦角 $\varphi$ 值,分别在地表以下0—10、10—20、20—30 cm深度位置处的试验结果。由图2可知,5种植物根—土复合体试样在地表以下3个不同深度处粘聚力 $c$ 值均显著高于素土粘聚力 $c$ 值,而内摩擦角 $\varphi$ 值未表现出明显变化规律。5种盐生植物粘聚力 $c$ 值具体表现为:海韭菜、芦苇、无脉苔草、赖草和洽草根—土复合体试样,在地表以下0—10、10—20、20—30 cm深度位置处,相对于素土其粘聚力 $c$ 值的增加幅度分别为153.11%,122.91%,84.72%,183.30%,143.34%,90.94%,154.00%,111.37%,76.73%,112.26%,93.61%,74.96%,67.85%,50.89%,30.55%,而内摩擦角 $\varphi$ 值变化相对不显著,这表明区内芦苇、海韭菜等5种植物其根系对内摩擦角 $\varphi$ 值影响程度不显著,这种复合体能显著提高土体粘聚力 $c$ 值且能增强土体抗剪强度,其主要归因于根系弹性模量大于土体弹性模量,且根系抗拉强度大于土体,即当土体发生剪切变形时,根系和土体共同组成的整体具有共同抵抗剪切变形作用,因此根系存在能起到有效增强土体抗剪强度作用<sup>[33]</sup>。

与此同时,由图2可知,5种盐生植物中芦苇根系增强土体粘聚力 $c$ 值作用相对较为显著,其次由大至小依次为海韭菜、芦苇、无脉苔草、赖草、洽草,5种植物复合体粘聚力 $c$ 值较素土平均提高139.19%,

120.25%,114.03%,93.61%,49.76%。上述5种植物根系对土体粘聚力增强作用存在差异主要原因在于:芦苇和海韭菜根系在土体中呈近似垂直状分布,故在试样中根系多数穿过剪切面,即当复合体发生剪切变形时,试样中根系基本均能起到抵抗剪切变形作用,而无脉苔草、赖草和洽草根根系在土体中则呈水平或倾斜状分布,且根系未表现出全部横穿过剪切面,使得试样中根系加筋作用未得到完全发挥出来。



注:横坐标1,2,3,4,5分别表示海韭菜、芦苇、无脉苔草、赖草和洽草5种盐生植物根—土复合体;①,②,③分别代表5种盐生植物根—土复合体地表以下0—10、10—20、20—30 cm 3个取样深度位置。

图2 研究区5种盐生植物根—土复合体和素土试样抗剪强度指标与取样深度之间关系

## 5 结论

(1) 区内芦苇和海韭菜根—土复合体粘聚力 $c$ 值与4种影响因素间的灰色关联度由大至小依次为:容重、含水量、根长密度(RLD)、根面积比(RAR);相应地,复合体其内摩擦角 $\varphi$ 值与影响因素间的关联度由大至小依次为:容重、含水量、根面积比(RAR)、根长密度(RLD)。无脉苔草、赖草和洽草根—土复合体粘聚力 $c$ 值、内摩擦角 $\varphi$ 值与4种影响因素间的灰色关联度由大至小依次为:容重、含水量、根重密度(RWD)、根长密度(RLD),由灰色关联度法分析结果表明,5种盐生植物复合体容重、含水量和根—土复合体的粘聚力 $c$ 值、内摩擦角 $\varphi$ 值相关性均较好。

(2) 随着取样位置深度由地表以下0—10 cm增至20—30 cm深度,芦苇和海韭菜根—土复合体粘聚力 $c$ 值与根长密度(RLD)和根面积比(RAR)均呈对数函数关系;无脉苔草、赖草和洽草根—土复合体粘聚力 $c$ 值与根长密度呈显著线性关系,且与根重密度均呈对数函数关系;随着取样深度由地表以下0—10 cm增至20—30 cm深度时,5种盐生植物复合体容重和土体含水量呈逐渐增大趋势,其粘聚力 $c$ 值呈逐渐减小的变化规律,而内摩擦角 $\varphi$ 值则未表现出显著变化规律。

(3) 5种盐生植物根系均能显著提高土体粘聚力 $c$ 值,且显著大于不含根系素土抗剪强度,从而起到有效



增强土体抗剪强度作用;5种盐生植物的内摩擦角 $\varphi$ 值的影响未表现出显著性,其中芦苇根系增强土体粘聚力作用相对较为显著,其次依次为海韭菜、无脉苔草、赖草和洽草,复合体粘聚力 $c$ 值较素土平均提高为139.19%,120.25%,114.03%,93.61%,49.76%。

#### 参考文献:

- [1] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [2] 贾恢先,孙学刚. 中国西北内陆盐生植物图谱[M]. 北京:中国林业出版社,2005.
- [3] 罗友弟. 青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J]. 水文地质工程地质,2010,37(4):116-120.
- [4] 李旭谦. 柴达木盆地草地生产条件及发展潜力[J]. 青海草业,2004,13(2):30-33.
- [5] 苗芸,孙克成,魏华. 盐渍土路基病害特征分析[J]. 华东公路,2015(1):16-19.
- [6] 仲德春. 西宁地区盐渍土的分布特征及地基处理研究[J]. 青海大学学报:自然科学版,2011,29(2):30-33.
- [7] 温利强,杨成斌,李士奎. 中国西北地区盐渍土分布及危害[J]. 工程与建设,2010,24(5):585-587.
- [8] 王云琦,王玉杰,张洪江,等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(3):40-45.
- [9] 陈安强,张丹,熊东红,等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(5):108-113.
- [10] 赵玉娇,胡夏嵩,李华坦,等. 寒旱环境灌木根系增强边坡土体抗剪强度特征[J]. 农业工程学报,2016,32(11):174-180.
- [11] Fu J T, Hu X S, Brierley G, et al. The influence of plant root system architectural properties upon the stability of loess hillslopes, Northeast Qinghai, China[J]. Journal of Mountain Science, 2016,13(5):785-801.
- [12] 张惠忍,李法虎,张心平. 天然草本植被根系对表层土壤抗剪强度的影响[J]. 中国农业大学学报,2015,20(4):189-195.
- [13] Pirnazarov A, Sellgren U. Reduced testing and modeling of the bearing capacity of rooted soil for wheeled forestry machines [J]. Journal of Terramechanics, 2015,60:23-31.
- [14] 叶传永. 杂斯库勒盐湖卤水与沉积物中铀的分布及富集机理[D]. 北京:核工业北京地质研究院,2013.
- [15] 黄麒,韩凤清. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [16] 范喆. 杂斯库勒湖泊钻孔记录的地球化学元素变化及古环境演化[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [17] 南京水利科学研究所. 土工试验规程 SL237—1999 [S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [18] 徐少君,曾波,类淑桐,等. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J]. 土壤学报,2011,48(1):160-167.
- [19] Bland W A, Dugas W A. Root length density from minirhizotron observations [J]. Agronomy Journal, 1988, 80(2):271-275.
- [20] Fan C C. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils[J]. Plant and Soil, 2012,355(1/2):103-119.
- [21] Preti F, Dani A, Laio F. Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes [J]. Ecological Engineering, 2010,36(3):305-316.
- [22] 张金珠,王振华,虎胆·吐马尔白. 秸秆覆盖对滴灌棉花土壤水盐运移及根系分布的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(12):1467-1476.
- [23] 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,1996,1(2):31-38.
- [24] 张晓勉,张金池,王云南,等. 钱塘江源头主要植被类型土壤抗剪强度研究[J]. 水土保持研究,2015,22(4):79-84.
- [25] Czarnes S, Hallett P D, Bengough A G, et al. Root-and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport[J]. European Journal of Soil Science, 2000,51(3):435-443.
- [26] 刘益良,刘晓立,付旭,等. 植物根系对低液限粉质黏土边坡浅层土体抗剪强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报,2016,24(3):384-390.
- [27] 范兴科,蒋定生. 黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):69-75.
- [28] 张晓明,王玉杰,夏一平,等. 重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度的灰色关联度分析与评价[J]. 水土保持研究,2007,14(2):145-147.
- [29] 王宇超,王得祥. 盐胁迫对木本滨藜叶绿素合成及净光合速率的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(10):151-158.
- [30] 李光莹,付江涛,余冬梅,等. 碱胁迫条件下草本植物根系力学强度试验研究[J]. 工程地质学报,2016,24(4):584-596.
- [31] 闫俊华,周国逸,申卫军. 用灰色关联法分析森林生态系统植被状况对地表径流系数的影响[J]. 应用与环境生物学报,2000,6(3):197-200.
- [32] 李想,王瑄,盛世博,等. 不同土地利用方式土壤抗剪强度及其影响因子分析[J]. 水土保持学报,2016,30(5):102-106.
- [33] 王磊. 植被根系固土力学机理试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2011.