

玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素*

郑子成¹ 张锡洲¹ 李廷轩¹ 金伟¹ 林超文²

(1. 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610006)

摘要: 采用野外实测与室内分析相结合的方法,对玉米各生育期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素进行了研究。结果表明:随着玉米生育期推进,0~5 cm 土层土壤抗剪强度持续增加,于成熟期达最大;5~10 cm 和 10~15 cm 土层表现为先增加后减小,在抽雄期达最大;15~20 cm 土层抗剪强度总体较大。玉米对 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 土层土壤抗剪强度的增强效应较好,其增强率在抽雄期最高。抗剪强度与土壤含水率呈线性函数关系,与土壤容重呈极显著线性正相关;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,土壤抗剪强度增强值与 0~1 mm 根长增加值呈极显著正相关。土壤抗剪强度随玉米生育期推进逐渐增强,含水率、容重和玉米根系对土壤抗剪强度具有较大影响,采用一定耕作和水保措施增加土壤表层含水率和容重,同时选取含 0~1 mm 根径较多的玉米品种对该区域水土流失防治具有重要意义。

关键词: 紫色土 玉米 抗剪强度 影响因素

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)05-0125-06

引言

土壤抗剪强度是表征土体力学性质的一个主要指标,直接反映了土体在外力作用下发生剪切变形的难易程度,可评价区域水土流失的强弱^[1]。土壤抗剪强度的研究,目前主要集中于土壤抗剪强度的测定方法、分布规律、影响因素等方面。张晓明等^[2]采用直接剪切法研究了重庆缙云山自然保护区典型植被原状土与重塑土的剪切差异。范兴科等^[3]对黄土高原浅层原状土抗剪强度分布规律进行了研究。在影响因素方面,土壤理化性质对抗剪强度有显著影响^[4],其中含水率和容重是影响抗剪强度的重要指标,当含水率达到一定程度时,对应的抗剪强度出现峰值^[5-6],土壤容重是土体结构密实程度的综合反映,对抗剪强度有较大影响^[7],当含水率和容重共同作用抗剪强度时,二者的交互作用对其粘聚力有显著影响^[8]。植物含根量与土壤黏聚力呈正相关关系,林木类植被主要是通过增强土壤黏聚力来提高土壤抗剪强度,在根系形态特征中,根系直径对土壤抗剪强度的影响最为显著,根土复合体抗剪强度随根系直径增加而增大^[7,9-10]。李建兴^[11]等对三峡库区护坡草本植物根系与土壤抗剪强度间关系进行了研究,表明根长密度和根表面密度可作为评估土壤抗剪强度的重要参数。可见,植

物根系通过对土壤锚固与加筋以及改善土壤物理性质对土壤抗剪强度具有重要影响^[11-13],虽取得了一定的成果,但主要集中在林木和草本类植株^[14-16],缺乏对农作物全生育期方面的研究。

坡耕地是我国水土流失严重地段,也是四川省水土流失的主要源地^[17]。因此,本文依据当地降雨频率及分布特点,以典型紫色土区坡耕地为研究对象,开展玉米全生育期土壤抗剪强度研究,以为紫色土区水土流失防治和农业可持续发展提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于长江上游沱江水系花椒沟小支流的响水滩上段,属四川省资阳市雁江区松涛镇的响水村与花椒村,平均海拔高度 395 m。区内夏季农耕地以种植玉米为主,辅以种植豇豆和海椒等。该区多年均降水量为 965.8 mm,70% 分布于 6~9 月份,年均温 16.8℃。土壤为遂宁组母质发育的紫色红棕紫泥, pH 值 7.28, 有机质质量比 5.1 g/kg,全氮和碱解氮质量比分别为 0.56 g/kg 和 54.5 mg/kg,全磷和有效磷质量比分别为 0.94 g/kg 和 6.26 mg/kg,全钾和有效钾质量比为 13.8 g/kg 和 97.3 mg/kg。

1.2 供试材料

本研究供试玉米品种为当地主栽的川单 13,于

收稿日期: 2013-07-09 修回日期: 2013-08-21

* 国家自然科学基金资助项目(40901138,41271307)和四川省学术和技术带头人培养资金资助项目(2012)

作者简介: 郑子成,教授,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究, E-mail: zichengzheng@aliyun.com

2011 年 4 月上旬播种,行距 80 cm、株距 30 cm。播种前基施氮肥和磷肥为 250 kg/hm² 和 125 kg/hm²,氮肥为尿素(含 N 质量分数 46.3%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 质量分数 12%),其中氮肥兑清水灌窝,磷肥干施于植株窝内,并在拔节前追施氮肥 150 kg/hm²,其他管理措施均按当地农耕习惯进行。

1.3 测定项目及方法

土壤抗剪强度测定采用荷兰产便携式 14.10 Pocket Vane Tester 型三头抗剪仪,采用 CL102 型(小号)旋头进行测试,计算公式为

$$Y=2.734X$$

式中 X ——实测值, kg/cm²

Y ——转换后的土壤抗剪强度, kg/cm²

试验测定按玉米苗期(5-7~5-9)、小喇叭口期(5-19~5-21)、大喇叭口期(6-11~6-12)、抽雄期(6-18~6-22)、成熟期(7-15~7-17) 5 个阶段进行。土壤抗剪强度测定时,分别从试验地坡上、坡中、坡下选取一个代表性的点,测定点离玉米主根 5 cm,测定区域尺寸为 15 cm×15 cm,分别按 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm 和 15~20 cm 4 个土层测定。同时,采用干燥法和环刀法对其土壤含水率和容重进行测定^[18]。测定结束后开挖 15 cm×15 cm×5 cm 土坑,将挖出土壤置于 0.25 mm 的筛中冲洗,根径、根表面积、根体积等根系参数均采用 WinRHIZO 根系分析系统进行分析测定。将扫描后的根系晾干并置于 80℃ 干燥箱中干燥 72 h,然后置于精密密度 1/1 000 的电子天平上称量,进行根系生物量测定。

1.4 数据处理及分析方法

选用 Excel 2003 进行图表制作,用 DPS v11.0 软件进行统计分析。土壤抗剪强度增强值界定为玉米种植地与裸地土壤抗剪强度之差。

2 结果与分析

2.1 玉米各生育期土壤抗剪强度变化特征

由表 1 可知,玉米各生育期土壤抗剪强度变化特征总体表现为:在同一土层土壤抗剪强度随玉米生育期推进而持续增加;同一生育期内,土壤抗剪强度表现出随土层加深而呈增加的分布特征;不同土层土壤抗剪强度在各生育期内变化特征呈现出一定差异。

0~5 cm 土层,随着玉米生育期的推进抗剪强度表现出持续增大的趋势,在成熟期达到最大,为苗期的 4.4 倍,方差分析表明成熟期抗剪强度显著高于抽雄期,大喇叭口期和小喇叭口期差异不显著,均显著小于抽雄期和大于苗期。5~10 cm 土层,土壤

抗剪强度随玉米生育期的推进表现为先增加后减小的趋势,在抽雄期达最大,是苗期的 1.73 倍,显著高于其他生育期。成熟期抗剪强度为 3.8 kg/cm²,较抽雄期减少 13.6%,这主要是由于抽雄期至成熟期,玉米根系部分开始衰老死亡,减小了根系固土能力。成熟期同大喇叭口期差异不显著,两者均显著高于小喇叭口期,苗期抗剪强度最小,显著小于其他生育期。10~15 cm 土层土壤抗剪强度随玉米各生育期变化特征同 5~10 cm 土层,均表现为随生育期的推进呈先增加后减小的趋势,在抽雄期土壤抗剪强度达最大。15~20 cm 土层,土壤抗剪强度总体数值较大,随生育期推进在小喇叭口期前呈增加趋势,其后保持稳定,苗期土壤抗剪强度显著低于其他生育期,其余生育期间差异不显著。

表 1 玉米全生育期不同土层下土壤抗剪强度变化特征

Tab.1 Characteristics of soil shear strength in different soil layers during the developmental stages of maize

生育期	土层深度/cm			
	0~5	5~10	10~15	15~20
苗期	0.8±0.1d ^d	2.5±0.3d ^c	3.7±0.4d ^b	5.3±0.6b ^a
小喇叭口期	1.2±0.1c ^d	3.0±0.4c ^c	4.6±0.4c ^b	6.9±0.5a ^a
大喇叭口期	1.2±0.1c ^d	3.7±0.4b ^c	5.4±0.6b ^b	7.1±0.7a ^a
抽雄期	2.6±0.3b ^d	4.4±0.4a ^c	5.9±0.3a ^b	7.3±0.7a ^a
成熟期	3.5±0.2a ^d	3.8±0.5b ^c	5.5±0.6b ^b	7.1±0.7a ^a

注:不同小写字母表示各生育期处理间差异显著($P<0.05$);上标不同小写字母表示各土层处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 土壤抗剪强度变化影响因素分析

2.2.1 土壤含水率

由图 1 可知,0~5 cm 土层土壤抗剪强度随土壤含水率增大呈线性增加,土壤含水率与土壤抗剪强度呈显著正相关($P<0.05$)。经测定可知,0~5 cm 土层土壤含水率在苗期至抽雄期较小,平均值为 8.93%,到成熟期后,土壤含水率有所增加,平均值为 10.35%,这主要因为研究区成熟期正值降雨较集中的时期,同时,成熟期玉米冠层较密,能有效阻挡阳光对地表的照射从而减少地表水分的蒸发,故成熟期土壤含水率较其他生育期大,可有效地提高表层土壤抗剪强度。随着土层的加深,5~10 cm 土层土壤含水率较表层土有较大的增加,其值为 18.05%~19.91%,土壤抗剪强度随含水率增大呈线性减小,二者呈线性函数关系,但并未达显著水平($P>0.05$);10~15 cm 和 15~20 cm 土层土壤抗剪强度与含水率关系与 5~10 cm 土层相同均未达显著水平,这可能是由于这些土层土壤抗剪强度不仅受含水率影响,而且还受其他因素较大的影响。

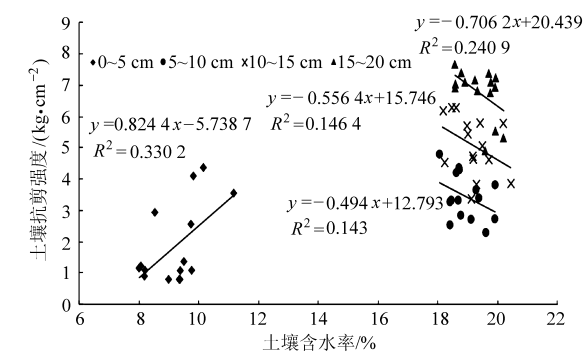


图1 不同土层土壤抗剪强度与含水率关系

Fig.1 Relationship between soil shear strength and water content in different soil layers

2.2.2 土壤容重

经测定可知，0~5 cm 土层土壤容重在玉米苗期最小，平均值为 1.17 g/cm³，随着生育期的推进，土壤容重呈逐渐增加的趋势，这主要是由于翻耕后土壤较疏松，随着雨滴对土粒的击打夯实作用和玉米根系对土粒的加固作用，土壤容重逐渐增加。5~10 cm 和 15~20 cm 土层土壤容重在玉米全生育期内变化特征与 0~5 cm 土层相似。15~20 cm 土层土壤容重总体较大，苗期平均值为 1.48 g/cm³，小喇叭口期后，土壤容重增加至 1.56 g/cm³，其后土壤容重平稳保持在较高水平。

将土壤容重与抗剪强度进行拟合，结果如图 2 所示，4 个土层土壤抗剪强度随土壤容重的增加呈线性增加，通过方差检验，各土层土壤抗剪强度与容重呈显著线性正相关 ($P < 0.05$)。随着玉米生育期的推进，土壤容重随之增大，土壤抗剪强度增加。

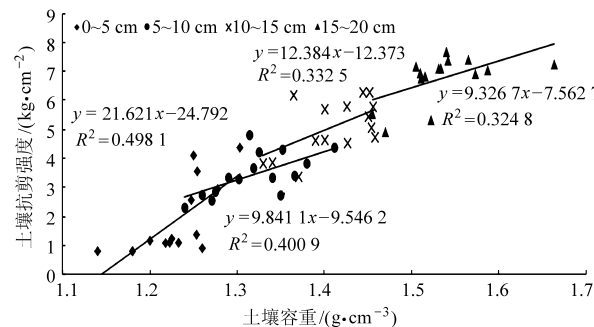


图2 不同土层土壤抗剪强度与土壤容重关系

Fig.2 Relationship between soil shear strength and bulk density in different soil layers

2.2.3 玉米根系

经测定可知，随着玉米生育期的推进，玉米根系含根量、根长和根系表面积等指标均呈逐步增大的趋势。当其达到抽雄期时，根系各参数均达最大值，到成熟期时根系各参数有所降低。根系各参数与土壤抗剪强度相关分析如表 2 所示。

由表 2 可知，0~5 cm 土层，土壤根系参数与土

壤抗剪强度相关性均未达显著水平，这主要是由于表层土壤易于受雨滴击溅、径流冲刷以及人为扰动等外界条件影响，故出现上述结果。5~10 cm 和 10~15 cm 土层，土壤受外界条件扰动小，抗剪强度主要受玉米根系的影响。根长、根系表面积和根系体积等指标与土壤抗剪强度呈显著正相关 ($P < 0.05$)，其中 0~0.5 mm 根长和 0.5~1.0 mm 根长与抗剪强度相关性达极显著水平 ($P < 0.01$)，这表明随着玉米生育期的推进，植株根系的生长特别是 0~0.5 mm 和 0.5~1.0 mm 根长的生长可以有效提高土壤抗剪强度，在 15~20 cm 土层，土壤根系特征与土壤抗剪强度相关性未达显著水平。

表 2 土壤根系特征与抗剪强度相关系数

Tab.2 Correlation between soil shear strength and root parameters

根系参数	土层深度/cm			
	0~5	5~10	10~15	15~20
含根量	0.42	0.79 **	0.77 **	0.10
根长	0.14	0.88 **	0.80 **	0.15
根系表面积	-0.02	0.80 **	0.81 **	0.02
平均根径	-0.39	-0.28	-0.25	-0.49
根系体积	-0.15	0.69 **	0.78 **	-0.22
0~0.5 mm 根长	0.16	0.89 **	0.79 **	0.18
0.5~1.0 mm 根长	-0.14	0.65 **	0.69 **	-0.16
0.5 mm 以上根长	-0.21	0.40	0.54 *	-0.26

注：* 表示在 0.05 水平上的相关性显著，** 表示在 0.01 水平上的相关性显著，下同。

2.3 土壤抗剪强度增强效应及影响因素分析

2.3.1 土壤抗剪强度增强效应

由表 3 可知，随着玉米生育期的推进，玉米地土壤抗剪强度均高于对应时期裸地土壤抗剪强度。可见，各生育期玉米植株对土壤抗剪强度产生了一定的增强效应。0~5 cm 土层，苗期土壤抗剪强度增强值为零，这主要是由于此时玉米植株较小，对土壤性质的影响较弱，随着玉米生育期的推进，土壤抗剪强度增强效应逐渐增加，至抽雄期达最大值，至成熟期时，土壤抗剪强度增强率有所降低。5~10 cm 和 10~15 cm 土层，土壤抗剪强度增强效应变化趋势与 0~5 cm 土层较为一致，抗剪强度增强率随生育期推进均呈先增加后减小的趋势，并在抽雄期达最大值。15~20 cm 土层，土壤抗剪强度增强率在苗期较小，小喇叭口期后，其增强率上升为 6.2%，其后生育期土壤抗剪强度增强率略有增加，但总体增强率较小。各土层玉米植株对土壤抗剪强度的增强效应表现出一定差异，在 5~10 cm 土层增强效应最强，15~20 cm 土层最差。

表 3 玉米各生育期不同土层土壤抗剪强度增强效应

Tab.3 Enhancement effect of soil shear strength in different soil layers during the developmental stages of maize							
土层深度/cm		参数	苗期	小喇叭口期	大喇叭口期	抽雄期	成熟期
0 ~ 5	裸地抗剪强度/(kg·cm ⁻²)		0. 8	1. 0	1. 0	1. 9	2. 6
	抗剪强度增强值/(kg·cm ⁻²)		0	0. 2	0. 2	0. 7	0. 9
	抗剪强度增强率/%		0	20. 0	20. 0	36. 8	34. 6
5 ~ 10	裸地抗剪强度/(kg·cm ⁻²)		2. 3	2. 5	2. 6	2. 7	2. 7
	抗剪强度增强值/(kg·cm ⁻²)		0. 2	0. 5	1. 1	1. 7	1. 1
	抗剪强度增强率/%		8. 7	20. 0	42. 3	63. 0	40. 7
10 ~ 15	裸地抗剪强度/(kg·cm ⁻²)		3. 6	4. 2	4. 3	4. 4	4. 4
	抗剪强度增强值/(kg·cm ⁻²)		0. 1	0. 9	1. 1	1. 5	1. 1
	抗剪强度增强率/%		2. 8	21. 4	25. 6	34. 1	25. 0
15 ~ 20	裸地抗剪强度/(kg·cm ⁻²)		5. 2	6. 5	6. 6	6. 6	6. 6
	抗剪强度增强值/(kg·cm ⁻²)		0. 1	0. 4	0. 5	0. 7	0. 5
	抗剪强度增强率/%		1. 9	6. 2	10. 6	7. 6	7. 6

2.3.2 土壤抗剪强度增强效应影响因素分析

随着玉米生育期的推进,各土层抗剪强度较对应裸地抗剪强度均有所增加,抗剪强度增强值与各影响因子增加值的相关性分析如表 4 所示。由表 4 可知,0 ~ 5 cm 土层土壤抗剪强度增强值主要与含水率和容重增加值呈显著或极显著正相关,这表明 0 ~ 5 cm 土层土壤含水率和容重的增加对土壤抗剪强度随生育期推进而增强具有重要影响。5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土层土壤抗剪强度的增强值与土壤容重和根系参数呈显著与极显著正相关,随着玉米根系的生长,根长、根系表面积和根系体积等参数均有较大增加,其增加值与抗剪强度增强值呈较强相关性,进一步分析发现,0 ~ 0.5 mm 和 0.5 ~ 1.0 mm 根长增加值与抗剪强度增强值相关性达显著和极显著水平,而与 1 mm 以上根长的相关性未达显著水平,这说明玉米根系的生长,特别是 0 ~ 0.5 mm 和 0.5 ~

1.0 m 根长的增加对抗剪强度的增强效应具有重要影响。15 ~ 20 cm 土层土壤容重较大,土壤抗剪强度总体也较强,土壤抗剪强度的增强值仅与土壤容重的增加值呈极显著正相关($P < 0.01$),与其他影响因子相关性较小,这主要是因为在此土层土壤容重较大,根系对这一条件土壤抗剪强度的增强效应大幅降低。

3 讨论

3.1 抗剪强度变化特征

本研究条件下,0 ~ 5 cm 土层苗期土壤抗剪强度较小(0.8 kg/cm²),与姚军等^[19]在黄土高原坡耕地研究结果一致,高于杜建会等^[20]在甘肃民勤绿洲灌丛沙堆的研究结果,这主要是由于本研究土壤较黄土具有较强的黏聚力。土壤抗剪强度随玉米生育期推进呈逐渐增加的趋势,至小喇叭口期时,土壤抗剪强度相对于苗期增加 50.0%,达 1.2 kg/cm²,高于姚军等^[19]在黄土高原坡耕地的研究结果,这主要是由于随着玉米生育期的推进,雨滴对土粒的击打夯实作用致使土壤容重变大,故土壤抗剪强度有所增加。抽雄期后,土壤抗剪强度相对于大喇叭口期增加 116.7%,这一方面是由于土壤容重增加和玉米根系的增多,另一方面是由于抽雄期玉米冠层截留作用较强^[21],改变了雨滴的分配,从而降低雨滴对土粒的溅蚀作用,导致土壤抗剪强度增加。成熟期抗剪强度是抽雄期的 1.35 倍,这是因为玉米成熟期接纳更多的降雨,土壤表面易形成地表结皮,地表结皮的形成对成熟期土壤抗剪强度的增加具有一定影响。

3.2 抗剪强度影响因素及增强效应

本研究条件下,土壤抗剪强度与含水率呈线性函数关系,0 ~ 5 cm 土层抗剪强度随含水率增加而

表 4 不同土层各因子增加值与土壤抗剪强度增强值相关系数

Tab.4 Correlation between added value of soil shear strength and added value of different influencing factors in different soil layers				
影响因子 增加值	土层深度/cm			
	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20
含水率	0. 68 **	- 0. 22	- 0. 17	- 0. 43
容重	0. 71 **	0. 55	0. 63 *	0. 77 **
含根量	0. 51	0. 79 **	0. 72 **	- 0. 55
根长	0. 41	0. 84 **	0. 80 **	- 0. 44
根系表面积	0. 29	0. 77 **	0. 78 **	- 0. 4
平均根径	- 0. 11	- 0. 27	- 0. 31	- 0. 1
根系体积	0. 16	0. 68 *	0. 73 **	- 0. 3
0 ~ 0.5 mm 根长	0. 43	0. 85 **	0. 80 **	- 0. 44
0.5 ~ 1.0 mm 根长	0. 01	0. 63 *	0. 64 *	- 0. 15
1.0mm 以上根长	0. 03	0. 44	0. 47	- 0. 06

增加,而其他土层抗剪强度随含水率增大而减小,与江浩浩等^[22]和陈红星等^[23]研究结果一致,这主要是因为含水率较低时,土壤颗粒周围的分子膜引力较大,水分子数量较少,对土粒的牵引作用并非很强;随着水分子数量的增多,牵引作用逐渐增强,随着含水率的继续增大,土壤颗粒周围的水膜厚度增大,水膜对土壤颗粒的黏结力减小,土壤颗粒之间摩擦力降低,土壤抗剪强度有所降低。土壤容重与抗剪强度呈极显著线性正相关,与范兴科等^[3]研究结果一致,主要是由于随着土壤容重的增大,土壤凝聚力呈增加的变化趋势,内摩擦角虽有减小,但幅度较小,故抗剪强度增加。随着玉米生育期推进,根系的增加对土壤抗剪强度具有较大影响,抗剪强度与玉米总根长、根系表面积和根系体积等根系参数呈极显著正相关,但与根径相关性不显著,这与刘秀萍等^[10]等在本根系对抗剪强度影响研究结果不一致,主要是因为不同根径的根系对土壤抗剪强度的影响方式存在差异,林木类植物根系主要是通过锚固作用增加土壤抗剪强度,而草本植物根系主要通过加筋作用提高表层土壤抗剪强度。

土壤抗剪强度增强率均随玉米生育期推进呈先增加后减小的趋势,在抽雄期达最大值。土壤含水率和容重对土壤抗剪强度增强值具有较大影响,同时根径 0~0.5 mm 和 0.5~1.0 mm 根长增加值在 5~10 cm 和 10~15 cm 两土层与抗剪强度增强值呈

极显著正相关性关系(表 4),玉米须根越发达,抗剪切应力越大^[24]。这说明随着玉米生育期的推进,0~1 mm 根长的增多对土壤抗剪强度增加具有重要意义。杨玉梅等^[25]和徐文远等^[26]研究指出 0~1 mm 根长是提高土壤抗冲性和抗蚀性的重要根系参数,这表明 0~1 mm 根长是增强土壤抗侵蚀能力的关键因子,是控制区域水土流失的关键因素之一。

4 结论

(1) 随着玉米生育期推进,0~5 cm 土层土壤抗剪强度呈逐渐增加的趋势,在成熟期达最大,5~10 cm 和 10~15 cm 土层土壤抗剪强度变化特征则表现为先增加后减小的趋势,在抽雄期达最大。15~20 cm 土层土壤抗剪强度总体值较大,其值随生育期推进在小喇叭口期前呈增加趋势,其后保持稳定。玉米对土壤抗剪强度的强化效应随生育期推进呈先增加后减少的趋势。

(2) 土壤含水率与容重对抗剪强度具有较大影响,同时玉米根系对土壤抗剪强度也具有较大影响,其中主要表现在 5~10 cm 和 10~15 cm 土层。

(3) 采用耕作措施来提高土壤表层和含水率和容重对增加该区域坡耕地表层土壤抗剪强度;选取 0~1 mm 根长较多的玉米品种增加其根系固土保土能力,对紫色土区农业可持续发展和区域水土流失防治具有重要意义。

参 考 文 献

- 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.
Wang Yunqi, Wang Yujie, Zhang Hongjiang, et al. Impacts of soil structure on shear-resistance of soil under different land uses in Jinyun Mountain of Chongqing City[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 40-45. (in Chinese)
- Docker B B, Hubble T C T. Modelling the distribution of enhanced soil shear strength beneath riparian trees of south-eastern Australia[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 921-934.
- 范兴科,蒋定生,赵合理. 黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J]. 水土保持学报,1997,3(4):69-75.
Fan Xingke, Jiang Dingsheng, Zhao Heli. Analysis on anti-shear strength of shallow original state soil in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 3(4): 69-75. (in Chinese)
- 张晓明,王玉杰,夏一平,等. 重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J]. 农业工程学报,2006,22(11):6-9.
Zhang X M, Wang Y J, Xia Y P, et al. Shear strengths of undisturbed and remolded soils of typical vegetations in Jinyun mountain of Chongqing City[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 6-9. (in Chinese)
- 倪九派,高明,魏朝富,等. 土壤含水率对浅层滑坡体不同层次土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(6):48-50.
Ni Jiupai, Gao Ming, Wei Chaofu, et al. Effects of soil water content on soil shearing strength to different soil layer of shallow landslide[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 48-50. (in Chinese)
- 张晓明,丁树文,蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. 农业工程学报,2012,28(5):241-245.
Zhang Xiaoming, Ding Shuwen, Cai Chongfa. Effects of drying and wetting on nonlinear decay of soil shear strength in slope disintegration erosion area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 241-245. (in Chinese)
- 扈萍,宋修广,吴登高. 高速公路边坡植草护坡的根固效应试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(2):442-444.
Hu Ping, Song Xiuguang, Wu Denggao. Experimental research on reinforcement mechanism of express way slope protection with greensward[J]. Rock and Soil Mechanic, 2008, 29(2): 442-444. (in Chinese)
- 倪九派,高明,魏朝富,等. 干密度和含水率对岩溶地区黄壤抗剪强度的影响——以重庆市南川区木渡河小流域为例[J]. 中国岩溶,2012,31(1):82-86.

- Ni Jiupai, Gao Ming, Wei Chaofu, et al. The effect of dry density and soil water content on yellow soil shearing strength in Karst Area[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(1): 82–86. (in Chinese)
- 9 张超波, 陈丽华, 刘秀萍. 黄土高原刺槐根系固土的力学增强效应评价[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 57–60.
Zhang Chaobo, Chen Lihua, Liu Xiuping. Triaxial compression test of loess root composites to evaluate mechanical effect of roots on reinforcing soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 57–60. (in Chinese)
- 10 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-loses composite[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 67–72. (in Chinese)
- 11 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 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)
- 12 王云琦, 王玉杰, 刘楠. 三峡库区典型林分土壤抗侵蚀性能及评价[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(6): 54–60.
Wang Yunqi, Wang Yujie, Liu Nan. Capability of soil erosion resistance and evaluation on it for typical forests in three gorges reservoir area[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(6): 54–60. (in Chinese)
- 13 Comino E, Marengo P, Rolli V. Root reinforcement effect of different grass species: a comparison between experimental and models results[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 110(1): 60–68.
- 14 Natasha P. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture [J]. *CATENA*, 2007, 69(3): 197–205.
- 15 Comino E, Druetta A. The effect of poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106: 194–201.
- 16 Lin D G, Huang B S, Lin S H. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 992–1006.
- 17 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 玉米植株冠层截留分异特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 208–211, 215.
Zheng Zicheng, Li Tingxuan, Zhang Xizhou, et al. Differentiation characteristics and influencing factors of rainfall interception in maize plants[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 208–211, 215. (in Chinese)
- 18 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 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 top soil 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 杜建会, 严平, 展秀丽, 等. 民勤绿洲白刺灌丛沙堆不同演化阶段表面抗蚀性及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 763–768.
Du Jianhui, Yan Ping, Zhan Xiuli, et al. Surface erosion-resistance of nitraria tangutorun nebkhas at different succession stages in Minqin oasis and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 763–768. (in Chinese)
- 21 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米植株对降雨再分配过程的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(12): 2608–2615.
Lin Daijie, Zheng Zicheng, Zhang Xizhou, et al. Study on the effect of maize plants on rainfall redistribution processes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(12): 2608–2615. (in Chinese)
- 22 江浩浩, 董希斌, 王海飙. 边坡土壤含水率对不同植被土壤抗剪强度的影响[J]. *森林工程*, 2009, 25(3): 77–80.
Jiang Haohao, Dong Xibin, Wang Haibiao. Effects of slope soil water content on soil shear strength of different vegetation[J]. *Forest Engineering*, 2009, 25(3): 77–80. (in Chinese)
- 23 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): 21–25.
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): 21–25. (in Chinese)
- 24 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)
- 25 杨玉梅, 郑子成, 李廷轩. 不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 64–68.
Yang Yumei, Zheng Zicheng, Li Tingxuan. Soil anti-scourability dynamic variation characteristics and its influencing factors under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 64–68. (in Chinese)
- 26 徐文远, 刘玉花, 王晓春, 等. G111公路纳嫩断9种护坡灌木根系增强土壤抗蚀性比较[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 72–77.
Xu Wenxuan, Liu Yuhua, Wang Xiaochun, et al. Comparison of the soil anti-erodibility enhanced by nine shrub roots at the section from Nehe to Nenjiang of the G111 Highway[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 72–77. (in Chinese)

Influence of Organic Ingredients Mixing Ratio on Anaerobic Fermentation

Liu Dan Li Wenzhe Liu Shuang Wang Ming Cao Lan Chang Suqing
(College of Engineering , Northeast Agricultural University , Harbin 150030 , China)

Abstract: In order to determine the interaction rule of fat, starch and protein in the process of anaerobic fermentation, the influence of different mixing ratios on the characteristics of methanogenesis and degradation was investigated using mixture design under mesophilic condition. The results revealed that when fat, starch, and protein was used as substrate separately, the methanogenesis performances were inhibited in different degrees, and the mean biochemical methane potentials (BMP) were 345.36, 59.80 and 135.87 mL/g, respectively, which accordingly accounted for 34%, 14% and 26% of theoretical methane production. At the same time, the degradation property was affected apparently. However, the synergistic effects on methanogenesis and degradation were obvious while the three components were mixed as substrates. The regression models between the organic ingredients mixing ratios and BMP and volatile solid (VS) degradation rate were established, furthermore, the parameter optimization was carried out. The optimization result was that as the ratio of fat, starch and protein was 36:30:33, BMP and VS degradation rate were maximum. Experimental verification showed that BMP and VS degradation rate were 451.36 mL/g and 79.62% respectively at optimal ratio.

Key words: Anaerobic fermentation Organic ingredients Mixture design Dynamics



(上接第 130 页)

Change Characteristics and Influencing Factors of Soil Shear Strength during Maize Growing Period

Zheng Zicheng¹ Zhang Xizhou¹ Li Tingxuan¹ Jin Wei¹ Lin Chaowen²
(1. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China
2. Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu 610006, China)

Abstract: In order to explore the change characteristics of soil shear strength, change characteristics and influence factors of soil shear strength were studied during maize growing period based on the method of field investigation and laboratory. The result showed that in the 0 ~ 5 cm soil layer, soil shear strength increased gradually with the maize growth period and reached the maximum in mature period. However, soil shear strength increased first and then decreased with the maize growth period in the 5 ~ 10 cm and 10 ~ 15 cm soil layers, and soil shear strength reached the maximum in tasseling period. Soil shear strength showed the higher values in the different maize growing periods. The reinforcing effects of the shear strength in the first three soil layers were the better, and the reinforcing rates were the highest in tasseling period of maize. There existed linear function between soil shear strength and the soil moisture, and there were significant positive linear correlations between soil shear strength and soil bulk density, root amount, root length, root volume. At the same time, there were significant positive correlations between the reinforcing values of the shear strength and increasing value of 0 ~ 1 mm root length. Soil shear strength enhanced gradually with the maize growth period, and soil water content, bulk density and maize root had a great influence on soil shear strength. So, it had significant importance for soil erosion control to select the maize variety with 0 ~ 1 mm root, and applied soil and water conservation measures to increase soil water content and bulk density.

Key words: Purple soil Maize Soil shear strength Influence factors