不同植被条件下土壤抗冲性及其影响因素

何淑勤[1]，宫渊波[1]，郑子成[2]，孔祥东[3]
(1.四川农业大学 林学院，四川 雅安 625014；2.四川农业大学
资源环境学院，四川 成都 611130；3.四川省水土保持局，四川 成都 610041)

摘　要：采用野外实地放水冲刷的方法，以刺槐林、混交林幼林、天然次生林、退耕岷江柏林、岷江柏幼林、灌木林地为研究对象，研究了土壤抗冲性变化特征及其影响因素。结果表明，不同植被条件下土壤径流量随冲刷时间的变化较明显，总体上表现为先增大后减小，呈单峰变化。对照裸地(CK)径流随时间变化量低于灌木林地，但高于其它植被条件。不同植被条件下土壤冲刷过程中含沙量呈先降低后趋于平缓的变化规律。退耕岷江柏林、灌木林和岷江柏幼林地在产流过程中径流含沙量随时间变化较平稳，其中退耕岷江柏林地径流含沙量最小。混交林地含沙量总体较小，趋于稳定的时间滞后于其它植被条件。不同植被条件下土壤抗冲指数由大到小依次表现为：退耕岷江柏林＞岷江柏幼林＞刺槐林＞灌木林＞天然次生林＞混交林幼林＞裸地(CK)。不同植被条件下，土壤容重与抗冲指数呈显著负相关，微团聚体组成中＜0.001 mm 颗粒与土壤抗冲指数间呈显著正相关关系，其它粒级颗粒与土壤抗冲指数之间的相关性均未达到显著。土壤速效磷与抗冲指数呈显著负相关关系。

关键词：径流量；含沙量；土壤抗冲性；植被类型；土壤养分
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2013)06-0075-05　　**中图分类号**：S157.1

Dynamic Change of Soil Anti-scourability and Its Influencing Factors Under Different Vegetation Types

HE Shu-qin[1], GONG Yuan-bo[1], ZHENG Zi-cheng[2], KONG Xiang-dong[3]
(1. *College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan* 625014, *China*;
2. *College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*; 3. *Sichuan Soil and Water Conservation Bureau, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

Abstract: On the basis of field washing experiments, dynamic variation characteristics of soil anti-scourability and its influencing factors were studied under six vegetation types including the conversion of farmland to Minjiang cypress, Minjiang young cypress, *Robinia pseudoacacia*, the shrub, natural secondary forest and the mixed young stands. The results showed that changes of runoff amount were significant with washing time under different vegetations. Runoff amount increased firstly with the increasing of washing time under different vegetations, and then decreased. Runoff amount of the control(CK) was lower than that of the shrub, and was higher than that of the other vegetations. Sediment concentration was keeping stability after decrease with the increasing of washing time under different vegetations. Sediment concentration was the lowest with the increasing of washing time for the conversion of farmland to Minjiang cypress. Sediment concentration was the lower with the increasing of washing time for the mixed young stands, and the time of steady sediment concentration was later than that of the other vegetations. The results also demonstrated that soil anti-scouring index changed in the following order of treatments: the conversion of farmland to Minjiang cypress＞Minjiang young cypress＞*Robinia pseudoacacia*＞the shrub＞natural secondary forest＞the mixed young stands＞the control(CK). Under different vegetations, there was significantly negative correlation between soil anti-scouring index and soil bulk density. There was significantly positive correlation be-

收稿日期：2013-06-06　　**修回日期**：2013-07-03
资助项目：国家“十一五”科技支撑计划项目“长江中上游西南退化生态系统恢复与重建技术”(2006BAC01A11)；国家科技“十二五”支撑计划项目“长江上游低山丘陵区生态综合整治技术及示范”(2011BAC09B05)
作者简介：何淑勤(1978—)，女(汉族)，陕西省商南县人，博士研究生，副教授，主要从事水土保持与土壤侵蚀方面的研究。E-mail：angelhsq@163.com。
通信作者：宫渊波(1957—)，男(汉族)，辽宁省昌图县人，博士，教授，主要从事植被恢复与水土保持的研究。，E-mail：gyb@sicau.edu.cn。

tween the size of <0.001 mm in micro-aggregate composition and soil anti-scouring index. There was no significantly different between content of the other particles in micro-aggregate composition and soil anti-scouring index. There was significantly negative correlation between content of soil available P and soil anti-scouring index.

Keywords: runoff; sediment concentration; soil anti-scourability; vegetation types; soil nutrient

中国水土流失与生态安全综合科学考察组 2008 年调查结果显示，我国水土流失面积有 3.57×10^6 km^2，占国土总面积的 37.19%，其中水力侵蚀面积达 1.61×10^6 km^2，长江流域水土流失面积高达 5.30×10^5 km^2。区域尺度土壤侵蚀的土壤学因子研究对水土流失的综合治理及预测模型的建立具有现实意义，而土壤抗冲性是最能体现出区域水土流失过程和规律的指示指标之一[1-2]。土壤抗冲性是指土壤抵抗外力机械破坏作用的能力，是土壤抗侵蚀性能的重要方面[3]。土壤抗冲性研究始于 20 世纪 50 年代[4]，主要集中在测试方法、评价指标、影响因素以及抗冲性的时空变化规律等方面[5-7]。且研究多局限于黄土高原区[8-11]。在影响因素方面，土壤抗冲性主要受土壤物理性质和外在的生物因素影响[12-14]。已有研究表明[15-16]紫色土区土壤抗冲性随土壤容重呈极显著负相关，而与土壤有机质、水稳定性团聚体含量和入渗能力等呈极显著正相关。可见，目前土壤抗冲性方面的研究主要集中于黄土区、紫色土区和红壤区等，而针对于特殊的水热条件和地貌特征的岷江上游山地森林—干旱河谷区研究甚少。岷江上游山地森林—干旱河谷交错带作为典型的生态脆弱区，它既是长江上游生态屏障的重要组成部分，更是成都平原的重要生态屏障和水源生命线。长期以来，在自然和人为因素的双重干扰下，区域内水土流失极为严重，直接影响长江上游和三峡库区的生态安全。因此，本研究采用实地放水冲刷法，开展该区域土壤抗冲性变化特征及影响因素，为揭示植被水土保持机理及有效防治区域水土流失提供理论基础。

1 研究区概况

研究区地处四川省西部理县杂谷脑河流域，属于岷江一级支流。该区域平均海拔 2 700 m，是川西平原与青藏高原的过渡地带，气候具有明显干湿季、日温差大，属于山地季风气候。在大地构造上属四川西南地槽区，金汤弧形褶皱带的一部分。山势陡峻，地形复杂，由西北向东南倾斜，平均坡度多在 40°以上。复杂的地形、地貌和海拔高差，导致水热重组，垂直气候带明显具有典型的干旱河谷气候。土壤以山地棕壤和褐土为主，植被以旱生灌丛为主，主要建群种有白刺花(*Sophora davidii*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、川甘亚菊(*Ajania potaninii*)、光果茯(*Caryopteris tangutica*)等。沿河谷逆流而上，植被类型分布表现为：乔木林—灌木林—矮灌木—半灌木—丘状矮小半灌木—半灌木—矮灌木—灌木林—乔木林。研究样地基本情况详见表 1。

表 1 试验样地基本情况

植被类型	海拔/m	坡位	坡向	土壤类型	样地主要植物种类			覆盖度/%
					乔木	灌木	草本	
天然次生林	2 790	上坡	阳坡	山地棕壤	冬瓜杨、川滇高山栎	小叶锦鸡儿、柳叶栒子	驴蹄草、单花赤芍、细齿异野芝麻	85
灌木林	2 690	上坡	阳坡	山地褐土	—	白刺花、沙棘	黄花蒿、茅草	80
刺槐林	2 560	中坡	阳坡	山地褐土	刺 槐	锥花小檗	茅草、龙牙草	50
混交林幼林	2 440	中坡	阳坡	山地褐土	岷江柏、油松、榆树、刺槐、新疆杨	小叶栒子、小叶蔷薇	茵陈蒿、黄花蒿、茅草、紫花苜蓿	60
岷江柏幼林	2 310	中坡	阳坡	山地褐土	岷江柏	尖叶栒子	三脉叶马兰、牛至	70
退耕岷江柏林	2 210	中坡	阳坡	山地褐土	油松、岷江柏	峨眉栒子、白刺花	黄花蒿、茵陈蒿	90
裸地(CK)	1 830	中坡	半阳坡	山地褐土	—	—	零星茅草、龙牙草	10

注：冬瓜杨(*Populus purdomii*)，川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)，刺槐(*Robinia pseudoacacia*)，岷江柏(*Cupressus chengiana*)，油松(*Pinus tabuliformis*)，榆树(*Ulmus pumila*)，新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis*)，小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)，柳叶栒子(*Cotoneaster salicifolius*)，沙棘(*Hippophae rhamnoides*)，短锥花小檗(*Berberis prattii*)，小叶栒子(*Cotoneaster microphyllus*)，小叶蔷薇(*Rosa willmottiae*)，尖叶栒子(*Cotoneaster acuminatus*)，枸杞(*Lycium chinense*)，驴蹄草(*Caltha palustris*)，单花赤芍(*Paeonia veitchii* var. *uniflora*)，细齿异野芝麻(*Heterolamium debile* var. *cardiophyllum*)，黄花蒿(*Artemisia annua*)，白茅(*Imperata cylindrica*)，龙牙草(*Agrimonia pilosa*)，茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)，紫花苜蓿(*Medicago sativa*)，三脉叶马兰(*Aster trinervius*)，牛至(*Origanum vulgare*)。

2　研究方法

2.1　样地布设

在野外调查的基础上,根据植被变化,结合当地坡度的实地调查情况进行样地的选择,在每个样地内布设 3 个样方,即每一样方设置微小区(2.0 m×0.3 m)进行原状土冲刷试验;利用环刀和铝盒采集样品后立即用胶布和塑料口袋密封,以防止土壤水分的蒸发,带回室内立即测定土壤容重;另采集土壤样品约 2 kg,供土壤机械组成、微团聚体、土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾的测定。土壤容重,机械组成,微团聚体,土壤养分均采用常规方法测定[17]。

2.2　土壤抗冲性测定及指标选择

在设置微小区上方,通过集流桶的开关控制不同水量,根据集流桶中的水位变化过程,即可推算出小区径流过程。基于坡度分布及植被状况,选择试验坡度为 30°的坡面,开展土壤抗冲性试验。以研究区暴雨降雨强度在标准径流小区内产生最大径流量计算的单宽流量作为本试验冲刷流量(2 L/min),冲刷时间设计为 21 min,分别在第 1,3,6,9,12,15,18 和 21 min采集径流与泥沙样。先量测径流量(体积法),然后采用比重法测定泥沙含量。土壤抗冲能力用冲失 1 g 土所需时间,即抗冲指数来表示:

$$ANS = T/WLDS$$

式中:ANS——单位流量土壤抗冲指数(min/g);T——冲刷历时(min);WLDS——冲失干土重(g)。

3　结果与分析

3.1　不同植被条件下样地径流量动态变化

由图 1 可知,不同植被条件下径流量随冲刷时间的变化较明显,总体上曲线呈先增大后减小的单峰变化。这主要是由于放水初期,不同植被条件下土壤结构性较好,随着水流冲刷作用的持续,土壤结构性受到不同程度的影响,故出现增加的趋势。对照裸地(CK)径流量随时间变化量低于灌木林地,但高于其它植被条件。灌木林地,经调查可知,地处放牧可及区域,由于零散牲畜的出入,导致土壤变得较为密实,故出现径流量高于裸地坡面。天然次生林地在冲刷全过程中径流量变化不大,第 18 min 达到最大值;岷江柏幼林地在冲刷过程中径流量也无较大变化,第 6 min达到最大值;刺槐林和退耕岷江柏林地径流量在冲刷全过程变化趋势基本一致,第 9 min 刺槐林地径流量达最大值,第 15 min 退耕岷江柏林地径流量达最大值;混交林幼林地在第 6 min 达到最大值;灌木林地在整个冲刷过程中径流量最大,第 9 min 径流量达最大值,随后随冲刷时间延长,径流量减小。裸地(CK)在第 9 min 径流量达最大值,随冲刷时间延长,径流量减小,第 18 min 后径流量有所增大。裸地(CK)、灌木林、混交林幼林、退耕岷江柏林、刺槐林、岷江柏幼林、天然次生林在冲刷过程中最大径流量分别是最小径流量的 1.91,1.51,1.65,2.90,2.62,1.21 和 4.08 倍。这主要是与不同植被条件下土壤的理化性质、地表组成物质有关。可见,合理植被的建设,有利于坡面径流的调控。

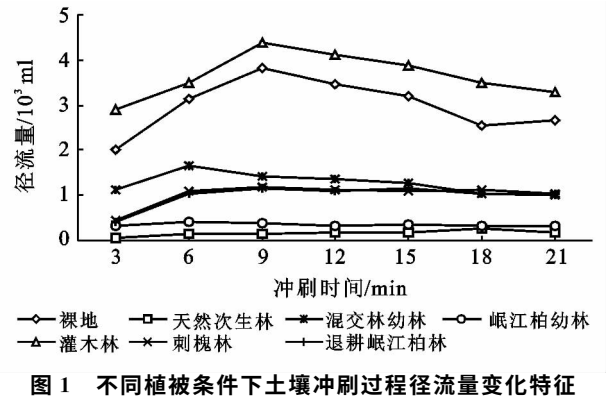


图 1　不同植被条件下土壤冲刷过程径流量变化特征

3.2　不同植被条件下样地含沙量动态变化

由图 2 可知,不同植被条件下土壤冲刷过程中径流含沙量呈先降低后趋于平缓的变化规律。对照裸地坡面含沙量在前 6 min 低于刺槐林、天然次生林和混交林幼林,而在 6～12 min 内含沙量低于天然次生林和混交林幼林地,在 12 min 含沙量仅低于天然次生林。在产流初期,不同植被下土壤的径流含沙量均较大,随着产流时间的延长表现出递减的变化趋势。这主要因为在径流的冲刷下,松散的表层土壤更易于被破坏和推动下移,从而导致径流含沙量在产流初期较大。退耕岷江柏林、灌木林和岷江柏幼林地在产流过程中径流含沙量随时间变化曲线较平稳,随着产流时间的延长呈递减趋势。刺槐林、天然次生林和裸地(CK)坡面,在产流 2 min 后,含沙量急剧减少,产流 6 min后,趋于一个平稳水平,产流 15 min 后,刺槐林地含沙量趋于一个较低水平。混交林地产流开始至产流 6 min,含沙量急剧减少,但是,在产流 6～9 min 含沙量有所增加,随后含沙量又开始减小,产流 15 min后,含沙量变化趋于相对稳定。可见,不同植被条件下土壤含沙量在产流后 6 min 内变化幅度较大,随着冲刷时间的延长呈小幅降低的变化,最后趋于相对稳定。

在相同的冲刷历时、冲刷流量下,退耕岷江柏林地含沙量最小,刺槐林地在前 6 min 的含沙量最大,天然次生林在 6 min 后含沙量却最大,混交林幼林地

含沙量总体偏小，趋于稳定的冲刷时间滞后于其它植被条件，这与其林下枯落物厚度及草本层覆盖度有关。混交林虽为幼林，但林下植被覆盖度相对较好，主要以杂草为主，在草本庞大根系的网络固持作用下，土壤很难被水流作用破坏和推动下移。而刺槐林地土壤由于人为的破坏，植被覆盖度最差，在径流的冲刷作用下，土壤更易被冲刷，因而其含沙量较大。天然次生林，主要以乔木为主，林下植覆盖度及枯落物较少，故导致其含沙量也较高。这与前述不同植被条件下土壤抗蚀性分析结果较一致。

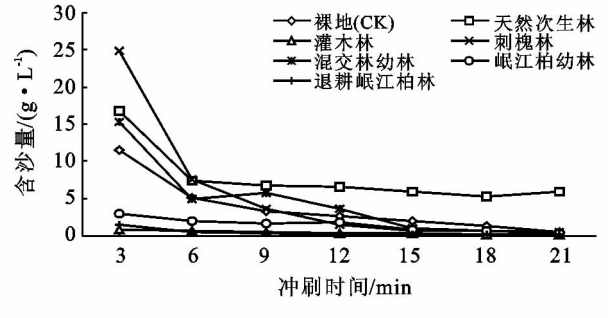


图 2 不同植被条件下冲刷过程中含沙量变化特征

3.3 不同植被条件下土壤抗冲指数动态变化

由图 3 可知，除天然次生林外，其它植被条件下土壤抗冲指数随着冲刷时间延长均表现为增大。随着冲刷时间的增加，退耕岷江柏林地土壤抗冲指数上升最快，其次为岷江柏幼林地。退耕岷江柏林地土壤抗冲指数在产流开始后 3～15 min 内土壤抗冲指数急剧上升，这表明其土壤抗冲性显著增强，随后趋于稳定水平；岷江柏幼林地在产流开始后 12～21 min 内土壤抗冲指数上升较快。退耕岷江柏林地土壤由于受人为管理措施、树种优化配置等因素影响，根系表现出较强的的穿插、网络、固结土体能力，林下土壤孔隙度有所改善，入渗能力增强，对冲刷地表的冲刷作用大幅减弱，故土壤抗冲指数增大。刺槐林地和混交林地土壤抗冲指数均在产流开始 9 min 后增幅较大，灌木林地和裸地(CK)土壤抗冲指数分别在产流开始 12 和 18 min 后有增大趋势。天然次生林地土壤抗冲指数在产流开始 9 min 内随着冲刷时间的增加而增大，9 min 后即呈波状变化，抗冲指数先减小再增大，减增交替出现。此外，在冲刷 9 min 后，不同植被条件下土壤抗冲性能，随着冲刷时间的延长表现出一定波动，但是整体上仍呈上升趋势。

可见，在产流开始后，随着冲刷时间的延长，不同植被条件下土壤抗冲性整体上处于上升的趋势。退耕岷江柏林地土壤抗冲性最强，可能是因为岷江柏根系发达，土壤中根系横向分布密集、紧密缠绕土体，改善了土壤理化性质，使其土壤密度、孔隙度及颗粒组成等趋于比较合理的状态；此外由于退耕年限较长，林下植被覆盖度较高，管护较好。岷江柏幼林地土壤抗冲性较好，主要与其根系发达有关，1 年生岷江柏幼苗主根长可达苗高 5 倍以上。混交林幼林地虽为油松、岷江柏、榆树、刺槐、新疆杨等植被的混交，但由于各种林分均处于幼林阶段，土壤有机质偏低，林下枯枝落叶较少，故土壤抗冲性最差。

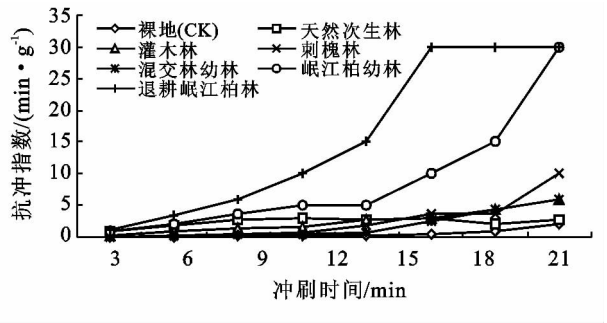


图 3 不同植被条件下土壤抗冲指数动态变化特征

3.4 土壤抗冲性影响因素分析

3.4.1 土壤容重对土壤抗冲性的影响 土壤水、热、气三相组成及其转化均取决于土壤容重。由图 4 可知，土壤容重与抗冲指数呈显著负相关，表明随着土壤容重的增加，土壤抗冲性能呈幂函数递减变化。可见，在水流冲刷条件下，土壤总孔隙数量随着容重的减小而增加，土体蓄纳水体能力增加，缓解了径流对表土的冲刷与剥蚀作用，导致其土壤抗冲性能增强。

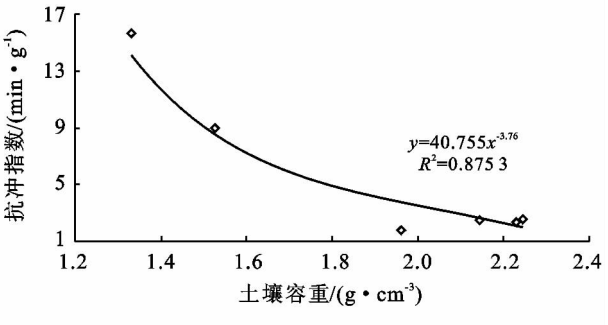


图 4 土壤容重与抗冲指数的关系

3.4.2 土壤机械组成、微团聚体组成对土壤抗冲性的影响 不同粒级的土粒与微团聚体在营养元素的保持、供应、释放及转化等方面发挥着不同的作用，故对土壤抗特性的影响作用也各不相同。土壤颗粒大小不同，抵抗径流冲刷搬运的能力也不同，且对透水性有较大的影响。由表 2 可知，土壤抗冲指数与土壤机械组成的各粒级颗粒之间相关性均未达到显著。微团聚体组成中，土壤抗冲指数除了与＜0.001 mm 颗粒间呈显著正相关，与其它粒级颗粒间的相关性也

均未达到显著。可见,土壤机械组成及微团聚体对研究区不同植被条件下土壤抗冲性影响主要体现在<0.001 mm 颗粒的微团聚体。这是因为土壤微团聚体组成中,干燥时多呈单粒松散状态的较大颗粒,遇水后在水中持水性很差,难以表现出膨胀;而湿时具有黏性和可塑性的较小颗粒,干时易于收缩,导致毛管断裂,毛管水上升速度减缓,而遇水会急剧膨胀,透水性极差,土体持水能力增加。因此,在径流的冲刷作用下,土壤颗粒越细小,土壤孔隙越易被堵塞,径流对土壤颗粒的破坏及迁移能力越低,土壤抗冲性能越强。

表 2　土壤抗冲性与机械组成、微团聚体组成的相关性分析

项 目	土壤机械组成					土壤微团聚体组成		
	1～0.05 mm	0.05～0.01 mm	<0.01 mm	0.01～0.001 mm	<0.001 mm	1～0.05 mm	<0.01 mm	<0.001 mm
土壤抗冲指数	−0.460	0.390	0.320	0.180	0.360	0.300	−0.370	0.870*

注:* 表示相关性达到($P<0.05$)显著水平。下同。

3.4.3　**土壤有机质及 N,P,K 含量对土壤抗冲性的影响**　土壤有机质及 N,P,K 含量是反映土壤肥力状况的主要指标,有机质是土壤团聚体形成时的胶结物质,能改善土壤结构,有利于土壤水稳性团聚体的形成。有研究结果表明,土壤中 N 和 P 含量的增加可有效提高土壤的抗蚀能力[18]。由表 3 可知,速效磷与抗冲指数呈显著负相关,说明土壤速效磷对土壤抗冲性影响较大。土壤有机质、全氮、速效钾与抗冲指数之间的相关性均未达到显著,可见,土壤有机质、全氮、速效钾的含量虽可间接改善土壤理化性质,但对土壤抗冲性的影响较小,这可能与研究区域植被类型与土壤性质有关。

表 3　土壤抗冲性与土壤有机质及 N,P,K 含量的相关性分析

指 标	有机质	全氮	速效磷	速效钾
抗冲指数	0.130	0.110	−0.820*	−0.550

4　结 论

(1) 不同植被条件下土壤径流量随冲刷时间的变化较明显,总体上曲线呈先增大后减小的单峰变化;不同植被条件下土壤冲刷过程中含沙量呈先降低后趋于平缓的变化特征。

(2) 不同植被条件下土壤抗冲指数大小依次为:退耕岷江柏林>岷江柏幼林>刺槐林>灌木林>天然次生林>混交林幼林>裸地。可见,退耕岷江柏林地土壤抗冲性能表现出较好的效果,混交林幼林抵抗径流冲刷作用表现出一定的局限性。

(3) 不同植被条件下土壤抗冲性与容重、微团聚体组成中<0.001 mm 颗粒部分关系较为密切。速效磷与抗冲指数呈显著负相关,土壤有机质、全氮、速效钾与抗冲指数之间的相关性均未达到显著。因此,可通过合理的植被建设,改善土壤理化性质,进而可提高土壤抗冲性。

[参 考 文 献]

[1] 张振国,黄建成,焦菊英,等. 安塞黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持研究,2008,15(1):28-31.

[2] 张爱国,张平仓,杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究[M]. 北京:地质出版社,2003:48-53.

[3] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. Earth Surface Process and Landforms, 2007, 32(9): 1323-1345.

[4] 朱显谟. 黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响[J]. 土壤学报,1960,8(2):110-120.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Fattet M, Fu Yongneng, Ghestem 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.

[8] 周正朝,上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J]. 生态学报,2006,26(10):3271-3275.

[9] 张光辉,刘国彬. 黄土丘陵区小流域土壤表面特性变化规律研究[J]. 地理科学,2001,21(2):118-121.

[10] 查小春,唐克丽. 黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化[J]. 地理学报,2003,58(3):464-469.

[11] 吕春娟,白中科,陈卫国,等. 黄土区大型排土场植被根系的抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持学报,2006,20(2):35-38,143.

[12] 李新平,王兆骞,陈欣,等. 红壤坡耕地人工模拟降雨条件下植物篱笆水土保持效应及机理研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):36-40.

(下转第 83 页)

在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(9):1841-1848.

[5] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控[M]. 北京:科学出版社,1990:118-134.

[6] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences[J]. Biology and Fertility Soils, 2004,41(2):265-272.

[7] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamic of organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate[J]. European Journal of Soil Science, 2000,51(4):595-605.

[8] Madari B, Machado P L O A, Torres E, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil [J]. Soil and Tillage Research, 2005,80(1/2):185-200.

[9] 赵红,袁培民,吕贻忠,等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤,2011,43(2):306-311.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:30-34.

[11] Ni Jinzhi, Xu Jianming, Xie Zhengmiao, et al. Changes of labile organic fractions in soils under different rotation systems[J]. Pedosphere, 2004,14(1):103-109.

[12] 李辉信,袁颖红,黄欠如. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2006,43(3):422-429.

[13] 刘晓利,何圆球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J]. 土壤,2009,41(1):84-89.

[14] 张孝存,郑粉莉,王彬,等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2011,39(5):90-95.

[15] 李云生,盛大海. 不同开垦年限农田黑土团聚体与土壤基础肥力的关系[J]. 现代化农业,2010,369(4):11-12.

[16] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等. 耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J]. 土壤学报,2009,46(1):154-158.

[17] 李海波,韩晓增,许艳丽,等. 黑土农田不同管理方式对根际土壤团聚体稳定性影响[J]. 水土保持学报,2008,22(3):110-115.

[18] Miao Shujie, Qiao Yunfa, Zhou Lianren. Aggregation stability and microbial activity of China′s black soils under different long-term fertilisation regimes[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2009, 52(1):57-67.

[19] 史奕,陈欣,沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报,2002,13(11):1495-1498.

[20] Changey K, Swift R S. Stability of soil aggregates in relation organic constituents and soil water content[J]. Soil Sci., 1990,41(1):73-83.

[21] 苗淑杰,周连仁,乔云发,等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响[J]. 土壤学报,2009,46(6):1068-1075.

[22] 徐江兵,李成亮,何圆球,等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报,2007,44(4):675-682.

(上接第 79 页)

[13] 刘玉花,王晓春,徐文远,等. G111 公路讷嫩段 8 种护坡灌木根系增强土壤抗冲性比较研究[J]. 水土保持学报,2010,24(6):32-37.

[14] Zhang Jianhui, Liu Gangcai, Ni Shijun, et al. Anti-scourability of purple soil on hillslopes with different land uses [J]. Science in China(E): Technological Sciences, 2003, 46(S1): 133-141.

[15] 史东梅,陈晏. 紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素[J]. 中国农业科学,2008,41(5):1400-1409.

[16] 邹翔,崔鹏,陈杰,等. 小江流域土壤抗冲性实验研究[J]. 水土保持学报,2004,18(2):71-73.

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社,1999.

[18] 卢金伟. 土壤团聚体水稳定性及其与土壤可蚀性之间关系研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2002.