

我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性

程琴娟^{1, 2}, 蔡强国^{2*}, 马文军³

(1 陕西师范大学学报编辑部, 西安 710062; 2 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101; 3 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 表土结皮是降雨与土壤共同作用下的产物, 某一土壤是否结皮、结皮的敏感程度如何, 取决于该土壤的性质及所处地区的降雨情况。我国广泛分布着多种理化性质迥异的土壤, 尤其是黄土、紫色土、红壤和黑土分布在我国水土流失严重的区域。但是, 土壤发育表土结皮的敏感性很少见报道。本文通过分析模拟降雨试验结果及前人研究结论, 提出了影响表土结皮发育敏感性的3个关键因素, 并基于此对我国四大水土流失典型区土壤表土结皮的敏感性进行了分析。研究表明: 细颗粒, 尤其是粉粒是表土结皮发育的物质基础; 团聚体稳定性是表土结皮发育快慢及程度的决定因素; 高强度降雨是表土结皮发育的必要条件。黄土高原地区土壤极易发育表土结皮, 四川紫色土区土壤发育表土结皮的概率大, 南方红壤区除花岗岩、页岩外其他母岩上发育的土壤很难发育表土结皮, 东北典型黑土不发育表土结皮, 而非典型黑土易发育表土结皮。

关键词: 表土结皮; 黄土; 红壤; 黑土; 紫色土

文章编号: 1000-0585(2008)06-1290-09

1 引言

表土结皮是在降雨打击压实作用下由于团聚体分散、颗粒重排、细颗粒运移而在土壤表面形成的致密层^[1~3]。表土结皮不仅影响土壤的水、气交换, 对作物播种质量和农业产量产生影响^[4, 5]; 其致密的结构还影响土壤的入渗能力, 对降雨产流产沙产生影响^[6~8]。

表土结皮是降雨与土壤共同作用下的产物, 某一土壤是否结皮、结皮的敏感程度如何, 取决于该土壤的性质及所处地区的降雨情况。纵观国内外大量文献, 表土结皮研究大多是在室内高强度、长历时的模拟降雨条件下进行的, 跟自然条件有一定的差距; 因此如果将室内试验结果应用于实践很可能会夸大或过分强调表土结皮的作用。另外, 由于土壤类型的多样性及其分布的地带性, 所研究的土壤大都带有明显的地域特色; 如果能将某一地区、某一土壤的试验结果推广应用到他区或他种土壤上在一定程度上意义深远。

我国土壤资源丰富, 类型多, 但目前表土结皮研究多限于黄土性土壤^[6~9], 红壤仅有少许报道^[10], 其他土壤很少见。本文根据室内模拟试验及前人研究结果, 探讨土壤结皮发育的关键影响因素, 提出表土结皮发育的判断指标, 在此基础上对我国四大水土流失典型区(黄土高原黄土区、南方红壤区、四川紫色土区、东北黑土区)土壤的表土结皮敏感性进行分析。

收稿日期: 2007-12-10; 修订日期: 2008-07-30

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40635027); 国家自然科学基金资助项目(40471084)

作者简介: 程琴娟(1981-), 女, 博士。主要从事坡地侵蚀及模拟研究。E-mail: cqj759@163.com

* 通讯作者: 蔡强国, 男, 研究员, 博导。E-mail: caiqg@igsrr.ac.cn

2 试验材料与方法

试验土样分别为山西省王家沟小流域的黄土、四川省南部县李子口小流域的紫色土、黑龙江省齐齐哈尔市拜泉县的典型黑土。基本理化性状见表 1，团聚体（湿筛法）分析结果见图 1。将土壤风干后，过 4 mm 筛，除去杂质，装填在改进摩根减蚀盘^[11]中，填土容重分别为 1.3 g/cm³（黄土）、1.2 g/cm³（紫色土）、1.1 g/cm³（黑土）。

表 1 供试土壤的理化性质

土壤	机械组成 (%)							EC (Mmol/ kg)	ESP (%)	有机质 (%)
	2~ 0.2	0.2~ 0.05	0.05~ 0.02	0.02~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.002	< 0.002			
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			
黄土	5.91	27.24	37.07	14.95	9.25	5.53	0.05	80.6	1.29	0.98
紫色土	0.07	7.27	20.16	33.23	28.95	10.28	0.04	228	0.60	1.72
黑土	6.66	11.54	22.46	13.46	11.82	9.24	24.82	394	0.48	4.26

表土结皮发育通过人工模拟降雨来实现。人工降雨设备由 SPRACO 锥形喷头（加拿大引进）、直立竖管（高 4.75 m）、延伸管（长 90 cm）及拉线构成^[12]。降雨方式采用两个喷头对喷，通过压力调节系统和阀门来控制降雨强度和雨滴粒径的分布。调节压力，经多次率定，当 $P_{左} = 0.08 MPa$ 、 $P_{右} = 0.07 MPa$ 时，雨强为 1 mm/min，均匀系数达 95.5%，雨滴中数直径为 1.44 mm。降雨历时为 2 小时。

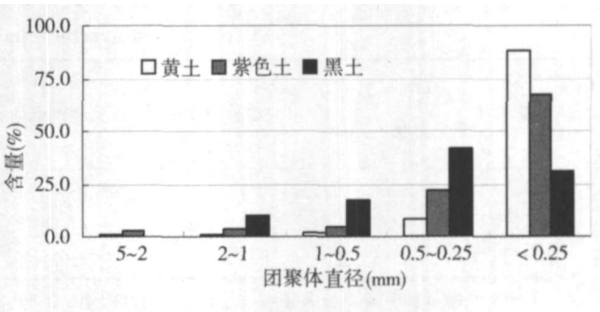


图 1 团聚体分布
Fig. 1 The distributions of aggregates

3 结果与讨论

3.1 表土结皮敏感性关键因子

3.1.1 物质基础——土壤质地 表土结皮的形成主要是由于团聚体分散释放出细颗粒物，遭受压实作用所致。土壤质地是影响表土结皮发育最重要的土壤变量之一，细颗粒物是表土结皮的物质基础。早在 1952 年 Lutz 断言表土结皮可以在除含有极少粉粒和粘粒的粗沙土以外的任何土壤上形成，而 Van der Watt 等^[13]指出粘粒含量小于 20% 的土壤最易结皮，因为高的粘粒含量导致土壤易于形成团聚体从而不利于结皮发育。在研究颗粒含量对结皮发育影响的试验中，Bradford 等^[14]得出如果粉粒含量从 51% 增加到 84%，粘粒含量由 45% 减少到 8%，则导致土壤表面强度增加 70%，入渗率降低 300%。吴发启等^[15]认为结皮的形成过程是以细砂和粗粉砂为骨架，以小于 0.01mm 的细小颗粒填充土壤孔隙的过程。Tackett 等^[16]也发现沙壤土较粘壤土易于结皮，尤其是粉粒含量高的土壤更易于结皮。

表 1 中，三种土壤的粉粒含量都很高，即使黑土也含有 47.7% 的粉粒，粉粒与粘粒

之和均超过 60%，紫色土高达 92% 之多。单从机械组成看，三种土壤都具备发育表土结皮的物质基础，试验结果也表明三种土壤均发育了表土结皮。但任何一种土壤，除质地为纯沙外，各级土粒由于不同原因相互团聚成团聚体^[17]，即土壤通常情况下并不是处于单粒状态；因此，机械组成（尤其是粉粒和粘粒含量）只能说明土壤是否具备发育表土结皮的物质基础；结皮的难易程度与土壤颗粒级配并不是直接线性关系，其可能受土壤团聚体聚合度、化学性质等因素影响^[10]。

3 1 2 关键因子——土壤结构状况 土粒在各种无机、有机胶结剂的作用下形成团聚体。团聚体的稳定性决定表土结皮发育的难易及快慢。小团聚体最容易形成结皮，其次是中等团聚体，再次是大团聚体，因为团聚体愈小，其内聚力愈小，愈容易分散而形成结皮^[18]。在相同的土壤上，由于施加了具有聚合作用的 PAM，土表的部分细颗粒被聚合成大团聚体，土壤的结构特征有了改善，土壤团聚体的稳定性得到显著提高，因此在雨滴打击下，团聚体不容易分散，结皮发育所需的细颗粒物质得不到满足，从而有效地抑制了土壤结皮的形成^[18,19]。由此得出，即使土壤的机械组成相同或相近，表土结皮发育程度及难易仍有很大差异，造成这种差异的原因是土壤的结构稳定性不同。

表 2 供试土壤的结构指标

Tab 2 Soil structural indexes

土壤	水稳性团聚体平均重量直径 ^① (mm)	≥0.5mm 水稳性团聚体 (%)	0.5~0.25mm 水稳性团聚体 (%)	团聚体分散度 ^② (%)	分散率 ^③ (%)	团聚度 ^④ (%)
黄土	0.19	3.5	7.9	71.7	80.63	38.7
紫色土	0.36	11.2	21.9	61.2	86.81	166.3
黑土	0.48	27.2	41.8	30.6	67.10	147.8

注：①水稳性团聚体平均重量直径 = $(\sum X_i \cdot W_i)$ ，式中， X_i 为任一颗粒级范围内团聚体的平均直径 (mm)， W_i 为对应于 X_i 的团聚体的百分含量；②团聚体分散度 = $\geq 0.25\text{mm}$ 团聚体含量 (干筛 - 湿筛) / $\geq 0.25\text{mm}$ 干筛团聚体含量 $\times 100$ ；③分散率 = 微团聚体分析中 $< 0.05\text{mm}$ 颗粒含量 / 机械组成分析中 $< 0.05\text{mm}$ 颗粒含量 $\times 100$ ；④团聚度 = (微团聚体分析中 $> 0.05\text{mm}$ 的颗粒含量 - 机械组成分析中 $> 0.05\text{mm}$ 颗粒含量) / 机械组成分析中 $> 0.05\text{mm}$ 的颗粒含量 $\times 100$

从三种土壤的结构指标来看 (图 1, 表 1, 表 2)，黑土含有较多的粘粒 (24.82%) 及高的有机质含量 (4.26%)，团聚度较高，以大团聚体为主，含量明显高于紫色土与黄土，以分布在 0.25~0.5mm 范围最多，水稳性团聚体平均重量直径在三种土壤中最大，而团聚体分散度最小，因此其团聚体稳定性在三种土壤中最强。紫色土的团聚度最高，但其分散率、团聚体分散度也很高，导致其团聚体稳定性并不高。黄土与紫色土的团聚体分布趋势相似， $< 0.25\text{mm}$ 的微团聚体占绝大多数，但团聚度最低，而分散率与团聚体分散度最高，因此黄土的团聚体稳定性最低。实际的试验结果表明，在雨强为 1.0mm/min 的降雨条件下，降雨初期黄土表面变化最为剧烈，20min 左右黄土表面基本平滑，0~30min 是黄土形成结皮的关键时期，黄土发育稳定结皮的时间为 30min；紫色土表面由凹凸不平逐渐光滑，0~30min 是紫色土形成发育最为迅速时期，紫色土发育稳定结皮的时间为 30min；黑土表面在 40min 之前无明显变化，40~120min 是黑土形成结皮的关键时期，黑土发育稳定结皮的时间为 120min^[20]。三种土壤表土结皮发育快慢的顺序为：黄土 > 紫色土 > 黑土。虽然三种土壤发育表土结皮的物质基础都具备，但是表土结皮发育的快慢却因

团聚体稳定性的不同而不同，土壤结构决定表土结皮的发育快慢，且表土结皮发育快慢与团聚体稳定性成反比关系。

3 1 3 必要条件——降雨情况 团聚状况是土壤本身的属性，如果没有外界动力的介入，土壤将处于聚合－分散的平衡状态。因此，土壤结皮是降雨打击夯实表层土壤的结果^[19]。雨滴的打击提供了破坏团聚体的能量，改变了土壤固有的平衡状态，使得土壤结构发生变化。如果降雨动能不够大，则土壤结构不会发生质的变化，经过自身的调节恢复到原有的平衡；如果降雨动能足够大，则土壤平衡被打破，结构发生变化形成表土结皮。已有的研究表明，形成结皮的先决条件是降雨，而降雨时间在 15min 以上、降雨量超过 18mm 时才有可能形成结皮^[21]。表土结皮的强度和速率随着雨滴打击能量的增加而增强和加快^[22]。

降雨历时、降雨量及降雨强度是降雨特征的三个重要统计量，而降雨强度与能量的关系最为密切。在本文中，考虑到试验的效果及三种土壤的可比性，本文选用了 1mm/min 的高强度模拟降雨。而之前的试验表明，消除雨滴动能后，黄土与黑土只有微弱的结皮发育，紫色土虽仍形成结皮，但并非团聚体破碎所致，而是淋移作用导致的结果^[20]。因此，高强度降雨（或高动能降雨）是表土结皮发育的外界动力条件。

3 2 水土流失典型区土壤表土结皮敏感性分析

3 2 1 黄土高原黄土区 黄土高原是世界上黄土分布面积最为广泛，黄土厚度最大，黄土地貌最为发育的典型高原地区^[23]。黄土母质上剖面发育不明显的耕种土壤，又称黄土性土壤^[24]。

由于土壤对母质的继承性，黄土性土壤颗粒组成与母质呈现出相似的规律。黄土的颗粒组成多半是细粉砂质，一般要占全部颗粒的 50% 以上，有的甚至可达 75% 以上。各地黄土颗粒的含量具有明显的规律性，一般西北粗而东南细，从西南向东也有同样的情况（表 3）。虽然黄土的颗粒分布规律明显，但是粉粒差异不大，粉粒与粘粒含量之和达 80% 左右，从而认为表土结皮发育的物质基础十分充沛。

表 3 我国黄土高原地区颗粒组成比较表（%）^[25]

由北至南				由西向东			
地点	0 5~ 0 05	0 05~ 0 002	< 0 002	地点	0 5~ 0 05	0 05~ 0 002	< 0 002
	mm	mm	mm		mm	mm	mm
定边	22	67	11	固原	12	74	14
环县	18	69	13	庆阳	13	70	17
庆阳	13	70	17	宁县	3	79	18
宁县	3	79	18	邠县	2	78	20
邠县	2	78	20	武功	3	73	24
武功	3	73	24	洛川	7	70	22

粘粒是土壤颗粒团聚胶结的重要因素。在黄土性土壤中，粘粒含量较少。另外，该区广种薄收，耕作粗放，土壤侵蚀严重，土壤有机质含量低，一般不超过 1%，陕北黄绵土与风砂土，有机质含量只有 0.6% 左右。因此土壤形成的团粒结构量少，而且稳固性差，农地团粒含量平均约 30%^[25]。

黄土高原的降雨受冬、夏季风交替的影响很大，年际变化大，年内分配不均，集中在夏季、秋初的几个月，短历时暴雨频繁（表 4），还不时遇到特大暴雨，危害十分

严重^[26, 27]。

因此，无论是颗粒组成、土壤的团粒结构，还是黄土高原区的降雨条件，都为黄土性土壤发育表土结皮提供了条件，该区土壤极易发育表土结皮。

表 4 黄土高原暴雨频数²⁷⁾

Tab 4 The frequency of rainstorms in the Loess Plateau

测站	资料年代	暴雨总 次数	其中		平均 次数	最多年 次数	无暴雨 次数
			6~ 8月	比例%			
西宁	28	37	35	95. 0	1. 32	3	1
兰州	28	37	31	83. 8	1. 32	5	8
临洮	25	70	59	84. 3	2. 80	6	6
固原	24	57	52	91. 2	2. 38	10	3
西峰镇	24	96	87	90. 6	4. 00	9	0
天水	26	65	58	89. 2	2. 50	6	1
榆林	26	94	82	93. 2	3. 62	9	0
延安	25	132	112	84. 8	5. 48	11	0
西安	28	102	84	82. 3	3. 64	8	2
大同	24	91	82	90. 1	3. 79	7	2
兴县	24	115	98	85. 2	4. 79	12	0
介休	26	125	105	84. 0	4. 81	11	1
长治	25	160	140	83. 8	6. 40	12	0

3 2 2 南方红壤区 我国热带与亚热带地区由于生物气候条件、植被类型、成土母质、地形以及利用情况的不同，形成多种土类和亚类，概括来讲，称为“红壤地区”^[28]。红壤母质类型多样，主要有第四纪红色粘土、第三纪红色砂岩、花岗岩、石灰岩、玄武岩等。不同母质上发育的土壤性质有很大差别（表 5）：玄武岩、第四纪红色粘土、石灰岩上发育的红壤，粉粒与粘粒含量占绝大部分；花岗岩与页岩发育的红壤，粉粒与粘粒含量占 50% 左右；而砂岩上发育的红壤，砂粒含量为主。仅从颗粒组成来看，砂岩上发育的红壤不具备发育表土结皮的基础。

表 5 不同母质发育红壤的理化性质^[28, 29]

Tab 5 The physical and chemical characteristics of red soil developed from different parent materials

土壤类型	深度 (cm)	有机质 (%)	颗粒含量 (%)		
			1~ 0. 05mm	0. 05~ 0. 01mm	< 0. 001mm
玄武岩上发育的（砖）红壤	0~ 23	4. 15	8. 0	35. 5	56. 5
花岗岩上发育的（赤）红壤	0~ 13	1. 74	61. 0*	21. 5	17. 5
第四纪红色粘土上发育的红壤	0~ 5	1. 14	6. 1	61. 0	32. 9
			< 0. 01mm		< 0. 001mm
页岩上发育的红壤	0~ 10	4. 28		39. 2	15. 2
砂岩上发育的红壤	0~ 10	3. 69		15. 7	8. 5
石灰岩上发育的红壤	0~ 10	4. 23		90. 1	61. 2

* 包括 1~ 3mm 的粗砂

影响土壤团聚体稳定性的因素很多。随着含水量的增加，颗粒间的粘结力会降低，有些胶结物质会软化；团聚体吸水膨胀时会产生不均匀的应力促使其崩解以及干燥团聚体淹

水时闭塞空气外逸时所产生的压力破坏等。不少研究者指出，红壤的微团聚性是很好的，这是由于以高岭石为主的粘土矿物的膨胀性较小以及具有胶结力很强的三、二氧化物参与下形成大量稳定性微团聚体之故。由于热带粘质红壤的颗粒细、排列紧、粘粒活度低、膨胀性小、并有较多无定形三、二氧化物的胶结作用，因此，所形成的团聚体尤其是微团聚体的水稳性很强^[28]。照此推断，玄武岩、第四纪红色粘土、石灰岩发育的红壤结构稳定，不易结皮。而花岗岩与页岩在遇有高强度降雨的情况下有发育表土结皮的可能性。

红壤地区雨量充沛，降雨强度较大。主要有我国华南前汛期暴雨（4~ 6 月）、长江流域梅雨期暴雨（6~ 7 月）、台风暴雨等^[30]。因此，可以说除花岗岩与页岩发育的红壤外，其他母质发育的红壤较难发育表土结皮。

3 2 3 四川紫色土区 紫色土是紫色岩上发育的一种岩性土，主要分布在四川红色盆地及其他省区部分地区。土壤形成深受母质影响，物理风化强烈，化学风化微弱，岩层屡受侵蚀，成土母质不断更新或堆积，使土壤发育处于相对幼年阶段。所以，紫色岩的组成与质地对紫色土性状有更为直接的影响^[28]。

四川盆地紫色土，依不同地质时期沉积母质划分，主要代表性地层为：沙溪庙组、蓬莱镇组、城墙岩群、遂宁组、夹关组、飞仙关组。粘粒含量大多 20% 左右，粉粒含量 40% 左右，砂粒含量最高 65.98%（表 6）。从颗粒组成上来看，粉粒与粘粒大多超过 50%，具备发育表土结皮的物质基础。

表 6 紫色土的颗粒组成（%）^[31]

Tab 6 The particle size composition of purple soils

母质	粒径（mm）					注
	2~ 0.2	0.2~ 0.02	0.02~ 0.002	< 0.002	2~ 0.02	
夹关组	6.18	55.10	22.30	16.34	61.28	砖红色厚砂岩夹薄层泥岩
城墙岩群	1.47	37.50	39.22	21.81	38.97	橙红色、紫色红泥岩与粉砂岩互层
蓬莱镇组	1.84	34.82	40.02	23.32	36.66	棕紫色厚泥岩与厚砂岩互层
遂宁组	4.65	32.30	40.84	22.22	36.95	棕红色厚泥岩夹薄层粉砂岩
沙溪庙组	13.53	37.73	30.38	18.36	51.26	灰棕紫色厚泥岩与灰紫色厚砂岩互层
飞仙关组	44.81	21.17	21.16	12.86	65.98	暗灰紫色厚层页岩夹薄层泥灰岩
雅安期黄壤	2.70	28.29	37.82	31.19	30.99	红黄色粘土、亚粘土与卵石混合的冰水堆积物

紫色土中含岩石碎屑较多，一般结构性较差；另外，紫色土有机质含量低（1.0% 左右），团粒结构水稳性差，分散性强，具有结构体水稳性低的特点^[31,32]。因此，紫色土在强降雨条件下易于发育表土结皮。

四川盆地西部边沿是暴雨日数较多区，因此，表土结皮在四川盆地地区较易发生。

3 2 4 东北黑土区 我国东北地区主要的土壤有黑土、黑钙土、栗钙土、暗棕色森林土、草甸土等。该区有着特殊的生物气候条件，年均温较低，但在生长季节，温度颇高，这时雨量充沛，植物生长繁茂，根系发达，土壤中有有机质来源极为丰富；同时，春、秋、冬季土壤温度较低，生物活动微弱，有机质分解缓慢而易于积累；所以，土壤表层腐殖质含量普遍高于国内其他地区。在土壤腐殖质组成中，作为团聚体天然胶结剂的胡敏酸占显著优势^[33]。表 7 中团粒含量较高的几种土壤（深厚黑土、黑土及黑钙土等）团粒含量很高，为典型黑土^[34]。本区暴雨集中在夏季，日数并不多。因此，东北黑土区特别是典型黑土

很难发育表土结皮，而非典型黑土则容易发育表土结皮。

表 7 东北主要土壤的水稳性团粒含量 (%)^[3]

Tab 7 The percentage of water stable aggregates for soils in Northeast China

土壤名称	地点	深度 (cm)	各级团粒占干土重百分比 (粒径单位: mm)						> 0.25mm 的团粒总量
			> 5	5~ 2	2~ 1	1~ 0.5	0.5~ 0.25	< 0.25	
暗棕色森林土	黑龙江省 (吴营)	0~ 16	2.6	18.4	17.2	9.9	8.2	43.7	56.3
		20~ 30	7.4	10.1	12.9	15.5	16.7	37.4	62.6
深厚黑土	黑龙江省 (嫩江 “ 九三 ” 地区)	0~ 10	9.1	9.2	13.2	14.2	20.0	34.3	65.7
		10~ 25	4.6	10.4	14.0	15.8	14.5	40.7	59.3
黑土	黑龙江省 (集贤 友谊农场)	0~ 10	18.1	22.4	12.2	9.8	12.4	25.1	74.9
		20~ 30	22.0	22.5	11.1	10.1	7.6	26.7	73.3
黑钙土	黑龙江省 (朱家坎)	0~ 10	37.8	8.9	5.5	4.4	10.5	32.9	67.1
		10~ 35	39.7	12.1	8.8	9.1	10.8	19.5	80.5
中厚暗栗钙土	黑龙江省 (海拉尔)	0~ 10	19.3	3.7	3.6	4.0	9.0	60.4	39.6
		24~ 34	6.0	2.9	4.9	5.3	9.4	71.5	28.5
草甸土	辽宁省 (沈阳)	0~ 20	4.8	10.0	17.6	24.4	11.4	31.8	68.2
强度潜育草甸土	黑龙江省 (集贤 友谊农场)	20~ 30	0	1.4	9.8	12.7	28.0	48.1	51.9
		50~ 60	0	0.5	1.2	5.2	26.1	67.0	33.0
深位柱状碱土	黑龙江省 (海拉尔)	0~ 10	4.1	4.9	4.2	6.0	9.8	71.0	29.0
		22~ 32	12.5	6.6	3.7	6.1	9.9	61.2	38.8
苏打氯化物盐土	黑龙江省 (海拉尔)	0~ 10	0.7	0.4	0.2	0.5	0.9	97.3	2.7
		10~ 15	0	0	0	0	0	100	0

4 结 论

土壤的机械组成、结构状况及降雨条件可以作为土壤表土结皮敏感性评价的三个指标。细颗粒是表土结皮形成的物质基础，粉粒的作用尤其重要；由于土壤通常以复粒形式存在，因此团聚体的稳定性决定表土结皮发育的快慢及程度，是表土结皮发育的决定因子；高强度降雨提供破坏团聚体的能量，改变了土壤的平衡状态，是表土结皮发育的必要条件。

黄土高原地区土壤颗粒组成多半为细粉砂质，团聚体稳定性差，暴雨频繁，表土结皮极易发生。四川紫色土区土壤粉粒与粘粒含量大多超过 50%，由于岩石碎屑较多，结构性较差，具有结构体水稳性低的特点，在强降雨条件下易于发育表土结皮。南方红壤区除花岗岩、页岩外其他母岩上发育的土壤，或由于砂粒含量为主、或由于团聚体稳定较强很难发育表土结皮。东北典型黑土团粒含量超过 50%，结构稳定，很难发育表土结皮；而非典型黑土发育表土结皮的可能性较大。

本文对我国四大水土流失典型区土壤的表土结皮敏感性进行了定性分析。事实上，即使是同一种土壤，由于土地利用的不同、侵蚀程度的不同、所处自然带的不同，其理化性质差异很大；另外，自然条件下的降雨情况十分复杂，对不同降雨条件（如：不同雨型、不同雨强）下不同性质土壤的表土结皮敏感性进行分析，并对表土结皮的影响进行估算与定量评价将是今后的研究方向与目标。

参考文献:

- [1] Slattery M C, Bryan R B. Laboratory experiments on surface seal development and its effect on interrill erosion processes. *Journal of Soil Science*, 1992, 43: 517~ 529.
- [2] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Sci Soc Am J*, 1981, 45: 848~ 851.
- [3] McIntyre D S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil Science*, 1958, 85: 185~ 189.
- [4] Shibru Daba. Note on effects of soil surface crust on the grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor*) in the Sahel. *Field Crops Research*, 1999, 61: 193~ 199.
- [5] 吴发启, 范文波, 郑子成, 等. 坡耕地暴雨结皮对作物生长发育影响的实验研究. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(2): 100~ 105.
- [6] 蔡强国, 吴淑安, 陈浩, 等. 坡耕地表土结皮对降雨径流和侵蚀产沙过程的影响. 见: 陈永宗, 等. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990. 48~ 57.
- [7] 吴发启, 范文波. 土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 1~ 3.
- [8] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 97~ 101.
- [9] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究. *土壤学报*, 2004, 41(4): 632~ 635.
- [10] 朱远达, 蔡强国, 胡霞, 等. 土壤理化性质对结皮形成的影响. *土壤学报*, 2004, 41(1): 13~ 19.
- [11] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原侵蚀产沙过程与模拟. 北京: 科学出版社, 1998. 1~ 150.
- [12] 蔡强国, 陈浩, 陆兆熊. 表土结皮在溅蚀和坡面侵蚀过程中的作用. 见: 陈永宗. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京: 气象出版社, 1989. 57~ 64.
- [13] Van der Watt H H, Valentin C. Soil crusting: African view. In: Summers M E, Stewart B A. *Soil Crusting: Chemical and Physical Processes*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1992. 301~ 329.
- [14] Bradford J M, Huang C. Physical components of crusting. In: Sumner M E, Stewart B A. *Soil Crusting: Chemical and Physical Processes*, Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1992. 55~ 72.
- [15] 吴发启, 范文波. 坡耕地黄墙土结皮的理化性质分析. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 22~ 24.
- [16] Tackett J L, Pearson R W. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci*, 1965, 996: 407~ 413.
- [17] 熊顺贵. 基础土壤学. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.
- [18] 胡霞, 蔡强国, 刘连友, 等. 聚丙烯酰胺(PAM)对黄土结皮形成的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 65~ 68.
- [19] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 降雨及聚丙烯酰胺(PAM)作用下土壤的封闭过程和结皮的形成. *生态学报*, 2002, 22(5): 674~ 681.
- [20] 卜崇峰. 表土结皮的发育机理及其侵蚀效应研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2006.
- [21] 贾志军, 王小平. 黄土表面结皮对夏闲坡耕地土壤水分的影响研究. *中国水土保持*, 2002, (9): 18~ 19.
- [22] Agassi M, Morin J, Shainberg I. Effect of raindrop impact energy and water salinity on the infiltration rate of sodic soil. *Soil Sci Soc Am J*, 1985, 49: 186~ 190.
- [23] 刘东生, 丁梦麟. 黄土高原·农业起源·水土保持. 北京: 地震出版社, 2004.
- [24] 中国农业百科全书(土壤卷). 北京: 农业出版社, 1996.
- [25] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业. 北京: 农业出版社, 1989.
- [26] 史辅成, 易元俊, 高治定. 黄河流域暴雨与洪水. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [27] 罗枢运, 孙逊, 陈永宗. 黄土高原自然条件研究. 西安: 陕西人民出版社, 1988.
- [28] 李庆逵. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983.
- [29] 赵其国, 等. 红壤物质循环及其调控. 北京: 科学出版社, 2002.
- [30] 包澄澜, 王德瀚, 等. 暴雨的分析与预报. 北京: 农业出版社, 1981.
- [31] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上篇). 北京: 科学出版社, 1991.
- [32] 何毓蓉, 等. 中国紫色土(下篇). 北京: 科学出版社, 2003.
- [33] 中国科学院林业土壤研究所. 中国东北土壤. 北京: 科学出版社, 1980.
- [34] 范昊明, 蔡强国, 陈光, 等. 世界三大黑土区水土流失与防治比较分析. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 387~ 393.

Study on sensitivity of soil surface crust formation in typical regions with serious soil and water loss, China

CHENG Qin-juan^{1, 2}, CAI Qiang-guo², MA Wen-jun³

(1 Journal Editorial Department, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China;

2 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3 College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Soil surface crust attracted great attention because of its effects on plant growth and output, and further infiltration and runoff production and sediment yield. Soil surface crust formation is the product of soil and rainfall. The sensitivity of soil crust formation depends on soil properties and rainfall characteristics; however, it is difficult to evaluate the sensitivity of soil surface crust formation because key factors of soil crust formation are still unclear. In addition, many types of soils, especially loess soil, purple soil, red soil and black soil with different physical and chemical properties are distributed spatially in serious soil and water loss regions of China, such as the Loess Plateau region and Sichuan. However, soil crust sensitivities of these regions are short of report.

Based on experiment results under simulated rainfalls and conclusions of other researchers, the paper considered that fine particles, aggregate stability and high rainfall intensity are three key factors affecting soil crust formation. Among them, fine particles, especially silt particles provide material for soil crust formation. Whereas, soil particles are commonly in the pattern of aggregates, so aggregates stability decides the rate and degree of soil crust development. In addition, rainfalls with high intensity disrupt the aggregates by its impact energy and change the balance condition of soil; so, rainfalls decide whether soil surface crust develops or not.

Analyzing the soil properties and rainfall characteristics, soil crust sensitivities of the above-mentioned regions are concluded. In the Loess Plateau region, silt particles are predominant, and aggregate stability is weak, whereas, rainstorms are frequent; therefore, it is sensitive for loess soil to form soil surface crust. In purple soil region, the content of silt and clay particles is more than 50%, and aggregate stability is weak due to the higher content of rock chipping; consequently, it is prone to form soil surface crust under rainfalls with high rainfall intensity. In red soil region, it is difficult to form soil surface crust except soils developed from granite and shale due to high sand particles or stable aggregates. In black soil region, it is impossible to form soil surface crust on typical black soils with aggregate content of more than 50%. However, soil crust can develop on non-typical black soils.

Key words: soil surface crust; loess soil; red soil; black soil; purple soil