

# 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系

安韶山<sup>1</sup>, 黄懿梅<sup>2</sup>, 李壁成<sup>1</sup>, 杨建国<sup>3,4</sup>

(1 中国科学院西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌, 712100 2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌, 712100;

3 中国农业大学水利与土木工程学院, 中国 北京, 100083 4 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川, 750002)

**摘要:** 在野外调查与室内分析的基础上, 对黄土丘陵区典型草原带植被自然恢复过程中土壤水稳性团聚体及其主要影响因子的演变规律进行了研究, 并用通径分析法对二者的相互关系进行了定量分析。结果表明: 随着植被演替, 土壤中大粒级水稳性团聚体含量逐步增加, > 5mm 粒级团聚体在土壤团粒结构中占主导地位, 含量占 50% ~ 80%。其次是 5~2mm 含量, 占到 10% ~ 15% 左右。不同群落之间 > 5mm 团聚体含量在 2m 深层土加权平均值比较结果为: 大羽茅群落 > 长芒草群落 > 铁杆蒿群落 > 百里香群落 > 香茅草群落, 其中大羽茅群落是香茅草群落 > 5mm 团聚体含量的近 5 倍, 长芒草群落也是香茅草群落的近 4 倍左右。主要影响因子对团聚体直接作用系数的大小为: 物理性粘粒 > 有机质 > 全氮 > 全铁 > 阳离子交换量 > 全量铝 > 游离铁 > 全磷 > pH 值 > 粘粒 > 碳酸钙。物理性粘粒、有机质和全氮是影响水稳性团聚体含量的主要因子。

**关键词:** 土壤团聚体; 土壤性质; 通径分析; 主成分分析

中图分类号: S158 Q146

文献标识码: A

文章编号: 0564-3945(2006)01-0045-06

土壤团聚体结构是土壤肥力的中心调节器, 其大小分布和稳定性影响着土壤的孔隙性、持水性、通透性和抗蚀性<sup>[1-3]</sup>。国内外许多学者把土壤团聚体的水稳性作为评价土壤可蚀性的重要指标, 认为只要能提高土壤团聚体的水稳性以及水稳性团聚体的数量和质量, 就能提高土壤的抗侵蚀能力<sup>[4-9]</sup>。在黄土高原土壤团聚体的研究往往是和土壤侵蚀联系在一起的, 而有关植被恢复中土壤团聚体的响应与演变、土壤团聚体与主要影响因子的关系方面研究较少, 且方法多见有简单相关分析、多元回归分析。但是简单相关不能全面考察变量间的相互关系, 使结果带有一定的片面性; 多元回归分析虽然在一定程度上能够消除变量之间的混淆, 能够真实地表现出各个自变量和因变量的关系, 但由于偏回归系数带有单位, 使原因对结果的效应不能直接进行比较。通径分析是在各变量无量纲的基础上, 计算通径系数, 通过通径系数的大小与正负来表示自变量对应变量的大小与方向, 且通径系数之间可进行相互比较, 比相关分析可提供更多的信息<sup>[10-12]</sup>。本文在分析黄土高原草原带植被自然恢复过程中土壤团聚体演变的基础上, 利用通径分析法对土壤团聚体与主要影响因子的相互关系进行研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 剖面选择与样品采集

云雾山草原保护区代表黄土高原地区以长芒草 (*Stipa bungeana*) 为建群种的草原生态系统。该区位于宁夏固原回族自治县城东北部, 北纬 36°14' ~ 36°20', 东经 106°25' ~ 106°29'。海拔 1800~2148m, 大部分在 2000m 以下, 为黄土覆盖的低山丘陵区, 土壤类型按照发生分类体系为山地灰褐土。除村庄、道路和农田外, 可保护草原面积 3400hm<sup>2</sup> (包括 133hm<sup>2</sup> 灌丛), 保护区划分为核心区、缓冲区和试验区 3 部分<sup>[12]</sup>。在核心区内, 按照不同植被演替阶段由高到低的顺序分别采集大羽茅群落、长芒草群落、铁杆蒿群落、百里香群落、香茅草群落下 2m 深层土壤原状土样和分析样品, 按照土壤颜色、结构、松紧度、碳酸钙反应等特征划分发生层次, 各采两次重复。

### 1.2 样品处理及分析

用塑料饭盒采集土壤各层原状土样, 带回实验室, 在实验室沿土壤自然结构轻轻剥开, 将原状土剥成直径为 10mm - 12mm 的小土块, 并剔除粗根和小石块。土样平摊在通风透气处, 自然风干。用吸管法测定质地与微团聚体, 用改进的 Yoder 法测定水稳性团聚体,

收稿日期: 2004-11-09 修订日期: 2004-11-30

基金项目: 国家自然科学基金 (40461006), 西北农林科技大学优秀人才项目 (04ZX011), 国家“十五”科技攻关重大项目 (2001BA606A-04)

作者简介: 安韶山 (1972-), 男, 宁夏人, 博士, 从事土壤学与流域生态与管理研究工作。Email: shan@ms.iswc.ac.cn

重复两次。土壤理化性质分析参照文献的标准方法进行<sup>[14 15]</sup>: 水稳性团聚体: Yoder法; 有机质:  $K_2Cr_2O_7$  - 浓硫酸外加加热法; pH值: 酸度计法; 全氮: 开氏法。全磷: 钼锑抗比色法。机械分析: 比重计法。  $Al_2O_3$ : KF取代 EDTA 容量法;  $Fe_2O_3$ : 原子吸收光谱法。碳酸钙: 气量法。

表 1 供试土壤环境条件

Table 1 The environmental condition of experiment soils

样号 Profile	地点 Site	坡位 Position of slope	海拔 (m) Horizon	利用方式 Land use	坡度 (°) Slope gradient	母质 Material	植被类型 Vegetation type
YW-4	马场河	坡底	2020	封禁	12	黄土	大羽茅群落 <i>Stipa gradis</i>
YW-2	对坡洼	坡中	2040	封禁	15	黄土	长芒草群落 <i>Stipa bungeana</i> <i>Trin Ledeb</i>
YW-6	堡子梁	坡顶	2040	封禁	10	黄土	铁杆蒿群落 <i>Artemisia</i> <i>sacrorum</i>
YW-9	蔡川洼	坡中	2030	封禁	13	黄土	百里香群落 <i>Thymus</i> <i>mongolicus</i> Ronn
YW-5	蔡川洼	坡中	2040	封禁	12	黄土	香茅草群落 <i>Hieracium</i> <i>odoratum</i>

## 2 结果分析

### 2.1 土壤团聚体特征

由表 2 可以看出, 不同植被演替阶段土壤团聚体差别较大, 土壤剖面团聚体含量分布呈现不同的规律: 其中长芒草群落表层 0~20cm 的 >0.25mm 总量并不是最高, 含量最高的层次在表下层 20~60cm, 为 835  $g\ kg^{-1}$ , 同样, 大羽茅群落含量最高的为 80~130cm 的 856  $g\ kg^{-1}$ , 由此可见, 在有机质含量较高的情况下, 团聚体含量受其他因素的影响, 特别是粘粒含量, 对土壤团聚体有明显的影响。百里香群落与香茅草两种群落, 土壤团聚体表现出随层次加深而降低的趋势, 其中香茅草群落 110~200cm 的团聚体总量为 354  $g\ kg^{-1}$ , 是表层含量的一半。

比较不同植被演替阶段下各粒级团聚体占总团聚体的比例发现, 有 50%~80% 的土壤团聚体粒径 >5mm, 表明该粒级团聚体在土壤团粒结构中占主导地位。其次是 5~2mm 含量, 占到 10%~15% 左右。不同群落之间 >5mm 团聚体含量在 2m 土层比较结果为: 大羽茅群落 > 长芒草群落 > 铁杆蒿群落 > 百里香群落 > 香茅草群落, 其中大羽茅群落是香茅草群落 >5mm 团聚体含量的近 5 倍, 长芒草群落也是香茅草群落的近 4 倍左右。MWD (平均重量直径) 也表现为相同的发展演变规律, 即大羽茅群落 > 长芒草群落 > 铁杆蒿群落 > 百里香群落 > 香茅草群落, 其中大羽茅群

落是香茅草群落 MWD 的近 3 倍, 长芒草群落也是香茅草群落的 2 倍多。

表 2 不同植被演替阶段土壤各粒级团聚体含量 ( $g\ kg^{-1}$ )

Table 2 The soil aggregates characteristics of different stage of vegetation succession

样号 Profile	层次 Soil layers	> 5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	> 0.25 mm	平均重量 直径 MWD
YW-4	0~40	520	103	59	72	35	789	3.10
	40~80	634	70	35	29	20	788	3.84
	80~130	716	64	31	32	13	856	3.48
	130~200	661	45	32	28	14	780	3.52
YW-2	0~20	498	114	81	78	49	820	3.10
	20~60	574	115	47	76	23	835	3.35
	60~150	518	103	59	47	23	750	3.03
YW-6	150~200	465	90	62	63	33	713	2.78
	0~30	628	89	44	43	25	829	3.53
	30~60	533	95	50	59	31	768	3.11
YW-9	60~140	383	212	109	82	34	820	2.74
	140~200	116	159	129	173	79	656	1.53
	0~10	586	73	28	22	12	721	3.20
YW-5	10~40	415	69	33	32	11	560	2.35
	40~120	138	57	78	80	53	406	1.17
	120~200	56	44	66	95	95	356	0.88
YW-5	0~20	566	91	44	43	22	766	3.22
	20~110	135	73	138	106	69	521	1.33
	110~200	52	40	65	104	93	354	0.85

### 2.2 影响因子特征

不同植物演替阶段 0~200cm 土层中的土壤性质分析结果见表 3。不同植被演替阶段土壤养分在剖面之间有明显的差异。表层土壤有机质含量变化于 15.4~40.5  $g\ kg^{-1}$  之间。土体有机质含量最高的层次为 YW4 表层 0~40cm 的 40.5  $g\ kg^{-1}$ , 最低为 YW5 的 110~200cm, 仅为 2.5  $g\ kg^{-1}$ 。其中 YW2、YW4 两个剖面有机质积累很深厚, 在 YW2 的 150~200cm 处, 有机质含量依然达到了 9.6  $g\ kg^{-1}$ , 这几乎与一般侵蚀土壤的表层有机质含量相当。YW~5 为香茅草群落, 是植物演替的初级阶段, 土壤剖面有机质含量不仅绝对含量较低, 从剖面分布来看, 表层非常薄, 在剖面上, 变化也很剧烈, 表层为 0~20cm 为 15.4  $g\ kg^{-1}$ , 110~200cm 仅为 2.5  $g\ kg^{-1}$ , 与一般黄土母质含量相当。

土壤全氮、全磷整体上分布随剖面深度下降而降低, 全氮含量变化于 0.219~3.381  $g\ kg^{-1}$  之间, 与有机质含量分布有明显的相关性。全磷从剖面分布来看, 虽然也随土壤层次变化有一定下降, 但变化程度不大, 变化于 0.208~0.395  $g\ kg^{-1}$  之间。在剖面变化上, YW4 和 YW2 变化缓慢, 在 0~200cm 处含量依然很高。

表 3 土壤团聚体主要影响因子特征

Table 3 The characteristics of factors that influenced waterstable aggregates

样号 Profile	层次 layers	全铝 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> g kg <sup>-1</sup>	全铁 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> g kg <sup>-1</sup>	碳酸钙 CaCO <sub>3</sub> g kg <sup>-1</sup>	全氮 Total N g kg <sup>-1</sup>	有机质 O. M g kg <sup>-1</sup>	全磷 Total P mg kg <sup>-1</sup>	pH	CEC cmol kg <sup>-1</sup>	游离铁 Fed g kg <sup>-1</sup>	< 0.002 mm	< 0.01 mm
YW - 2	0~ 20	124.01	46.51	88.5	2.251	31.5	0.344	8.02	19.50	6.42	275	462
	20~ 60	127.02	47.40	82.5	2.207	28.7	0.327	8.10	17.25	5.75	287	468
	60~ 150	125.80	45.35	143.9	1.300	18.7	0.306	7.97	16.00	5.55	312	507
	150~ 200	120.00	42.92	163.7	0.756	9.6	0.265	8.00	14.50	5.01	297	472
YW - 4	0~ 40	128.75	46.95	46.9	2.774	40.5	0.392	8.13	34.75	5.38	260	454
	40~ 80	126.58	49.26	72.6	2.126	28.1	0.395	8.19	31.25	5.77	323	486
	80~ 130	125.96	46.64	91.4	1.703	27.0	0.39	8.14	34.50	5.69	303	511
	130~ 200	121.68	45.42	103.5	1.463	20.8	0.343	8.17	30.75	5.75	329	527
YW - 5	0~ 20	119.21	42.85	138.9	1.054	15.4	0.245	7.96	21.75	5.21	250	422
	20~ 110	117.91	41.76	136.0	0.29	3.6	0.241	8.21	21.25	5.03	228	368
	110~ 200	116.66	41.55	128.1	0.219	2.5	0.255	8.20	21.75	4.86	230	347
YW - 6	0~ 30	120.17	44.18	67.7	2.386	34.7	0.326	7.99	29.00	5.71	291	468
	30~ 60	118.69	45.42	112.2	1.640	22.9	0.287	8.03	26.00	5.35	323	493
	60~ 140	112.38	42.21	155.8	0.507	7.1	0.243	7.95	20.00	5.41	313	491
	140~ 200	114.31	42.92	136.0	0.292	4.1	0.239	8.20	19.50	4.89	311	462
YW - 9	0~ 10	125.06	44.35	116.7	1.618	27.0	0.287	7.89	25.75	5.61	224	414
	10~ 40	119.54	44.07	172.6	0.937	14.4	0.27	7.96	23.00	5.81	281	465
	40~ 120	118.01	42.36	159.1	0.471	7.2	0.238	8.02	17.00	5.73	253	423
	120~ 200	116.52	42.14	130.1	0.235	4.2	0.211	8.03	15.44	5.33	228	401

比较各土壤剖面表层与下层来看, < 0.002mm 与物理性粘粒 < 0.01mm 两个粒级均为表层 < 表下层, 说明在当地水分条件下, 土壤粘粒有移动的趋势。尤其是代表性土壤剖面 YW 2 YW 4 物理性粘粒 < 0.01mm 含量最高的层次分别出现在 60~ 150cm 与 130~ 200cm 处。在 YW 4 土体中下部, 出现了明显的粘化层, 说明粘粒移动明显, 其他各剖面虽然其含量未达到粘化层标准, 也表现出粘粒有移动现象。大羽茅群落条件下, 土壤发育最好, 除了土壤养分含量较高外, 土壤机械组成也发生了明显的变化, 出现了粘化层, 这与该类土壤所处的环

境条件, 如土壤水分条件好、坡度小等有关。

从铁、铝氧化物在剖面上的分布来看, 二者均表现为随土层深度增加而降低的趋势, 说明土壤铁、铝氧化物发生了一定的风化。在植被演替的初级阶段, 香茅草群落下的土壤剖面上, 铁、铝氧化物绝对含量明显低于其他土壤, 顶级群落大羽茅群落与长芒草群落下的土壤铁、铝氧化物含量不仅绝对含量较高, 在 2m 土层内变化也不明显, 说明随着植被演替的发展, 受植被变化与土壤水分等因素的综合作用下, 土壤化学风化在土体中有微弱的变化。

表 4 土壤团聚体总量 (&gt; 0.25mm) 与土壤性质的相关系数 (r)

Table 4 Correlation coefficient between the soil aggregates and soil properties

	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)	X(9)	X(10)	X(11)	Y
X(1)	1.0000	0.8528*	-0.6862*	0.7963*	0.7882*	0.8576*	0.0942	0.3816	0.5749	0.0828	0.3283	0.4259
X(2)		1.0000	-0.7507*	0.8390*	0.8158*	0.8984*	0.1216	0.4758	0.7157*	0.4383	0.5630	0.5972
X(3)			1.0000	-0.8806*	-0.8799*	-0.8404*	-0.2748	-0.7157*	-0.5769*	-0.0312	-0.1776	-0.3738
X(4)				1.0000	0.9945*	0.8485*	-0.1380	0.5243	0.7419*	0.2166	0.4388	0.6448*
X(5)					1.0000	0.8573*	-0.1482	0.5706	0.7324*	0.2099	0.4513	0.6569*
X(6)						1.0000	0.1986	0.7044*	0.6873*	0.2977	0.4884	0.5209
X(7)							1.0000	0.3712	-0.2279	-0.1809	-0.3149	-0.4609
X(8)								1.0000	0.2523	0.1408	0.2416	0.3156
X(9)									1.0000	0.3400	0.5308	0.5776
X(10)										1.0000	0.9138	0.6416*
X(11)											1.0000	0.8328*
Y												1.0000

注: \*\* 0.01水平显著, \* 0.05水平显著

## 2.3 团聚体与影响因素的简单相关分析

> 0.25mm 土壤团聚体总量与全氮、有机质、粘

粒、物理性粘粒呈极显著的正相关关系, 相关系数分别为: 0.6448, 0.6569, 0.6416, 0.8328, 说明土壤有机

质、全氮、粘粒、物理性粘粒含量是影响土壤团聚体的主要因素(表 4)。土壤团聚体总量与全铁、全磷和阳离子交换量呈显著相关, 相关系数分别为 0.5927、0.5209 和 0.5776, 与碳酸钙含量和 pH 值呈现负相关关系, 但不显著, 说明碳酸钙含量在石灰性土壤上对团聚体的影响不是很明显。

表 4 中  $X_i$  ( $i=1\sim 11$ ) 分别指全量铝、全量铁、碳酸钙、全氮、有机质、全磷、pH 值、阳离子交换量

表 5 土壤团聚体总量与土壤性质的通径系数

Table 5 Path coefficient between the soil aggregate and soil properties

	X(1)-Y	X(2)-Y	X(3)-Y	X(4)-Y	X(5)-Y	X(6)-Y	X(7)-Y	X(8)-Y	X(9)-Y	X(10)-Y	X(11)-Y
X(1)	-0.1351	0.6687	0.9783	1.2860	-2.4105	-0.4710	-0.0703	0.0948	-0.1568	-0.1230	0.7648
X(2)	-0.1152	0.7842	1.0694	1.3549	-2.4950	-0.4934	-0.0907	0.1182	-0.1952	-0.6512	1.3115
X(3)	0.0927	-0.5882	-1.4258	-1.4221	2.6910	0.4616	0.2052	-0.1782	0.1574	0.0464	-0.4136
X(4)	-0.1076	0.6579	1.2556	1.6150	-3.0413	-0.4660	0.1030	0.1302	-0.2023	-0.3218	1.0222
X(5)	-0.1065	0.6398	1.2546	1.6060	-3.0582	-0.4708	0.1107	0.1417	-0.1997	-0.3119	1.0513
X(6)	-0.1159	0.0745	1.1983	1.3703	-2.6217	-0.5492	-0.1482	0.1750	-0.1874	-0.4424	1.1377
X(7)	-0.0127	0.0954	0.3918	-0.2229	0.4535	-0.1091	-0.7465	0.0922	0.0622	0.2688	-0.7335
X(8)	-0.0516	0.3731	1.0230	0.8468	-1.7450	-0.3869	-0.2771	0.2484	-0.0688	-0.2091	0.5628
X(9)	-0.0777	0.5612	0.8226	1.1981	-2.2398	-0.3774	0.1701	0.0626	-0.2727	-0.5052	1.2358
X(10)	-0.0112	0.3437	0.0445	0.3498	-0.6419	-0.1635	0.1350	0.0350	-0.0927	-1.4859	2.1288
X(11)	-0.0446	0.4415	0.2532	0.7086	-1.3801	-0.2682	0.2350	0.0600	-0.1447	-1.3578	2.3296

注:  $X_i$  ( $i=1\sim 11$ ) 分别指全量铝、全量铁、碳酸钙、全氮、有机质、全磷、pH 值、阳离子交换量 (CEC)、游离铁、粘粒 ( $< 0.001\text{mm}$ ) 物理性粘粒 ( $< 0.01\text{mm}$ ) Y 为  $> 0.25\text{mm}$  团聚体总量。剩余通径系数: 0.1567

影响因子对水稳性团聚体直接作用系数的大小为: 物理性粘粒  $>$  有机质  $>$  全氮  $>$  全铁  $>$  阳离子交换量  $>$  全量铝  $>$  游离铁  $>$  全磷  $>$  pH 值  $>$  粘粒  $>$  碳酸钙。其中物理性粘粒、全氮、全铁对团聚体直接作用的系数为正, 其余各因素对团聚体直接作用系数为负。物理性粘粒对团聚体的直接作用系数与作用系数总和是所有影响因素中最大的, 土壤中有有机物质转化形成的新的腐殖质与土壤中  $< 0.01\text{mm}$  物理性粘粒结合, 再同其他有机的、矿物质颗粒结合胶结形成较大的团聚体。这也说明, 在土壤母质相似的前提下, 保持土壤粘粒部分对提高土壤抗蚀抗冲能力具有非常重要的作用。有机质对团聚体直接作用的系数最小, 但其通过碳酸钙、全氮、物理性粘粒等因素对团聚体间接影响的系数对团聚体起正的影响作用, 作用系数总合表现为正, 而且是仅次于物理性粘粒的重要影响因素。可见有机质在土壤团聚体形成过程中作用非常明显。全氮对土壤团聚体的直接作用系数是仅次于物理性粘粒的重要因素, 而其作用系数总和也非常大, 排在物理性粘粒和有机质之后, 全氮通过碳酸钙和物理性粘粒对团聚体间接作用系数很大。全氮含量存在于土壤最细粒部分(细粘粒或粘粒级), 对土壤团聚体的形成有很大的影响<sup>[16]</sup>。全铁对土壤团聚体的直接作用系数也非

(CEC)、游离铁、粘粒 ( $< 0.002\text{mm}$ ) 物理性粘粒 ( $< 0.01\text{mm}$ ) Y 为  $> 0.25\text{mm}$  团聚体总量。

## 2.4 土壤 $> 0.25\text{mm}$ 团聚体总量与影响因子的通径分析

土壤胶结物质对团粒的影响作用的过程中, 彼此之间并不是孤立的, 而是存在着相互制约、互相促进的复杂关系。通径分析结果见表 5。

常大, 是仅次于物理性粘粒、有机质和全氮的影响因子, 土壤中铁铝氧化物及其水合物通常带有正电荷, 具有比粘粒矿物更大的表面积, 作为胶膜覆盖在粘粒矿物表面, 所以, 铁铝氧化物及其水合物在团聚体形成过程中, 起着重要作用, 充当“桥”的作用<sup>[16-18]</sup>

## 2.5 主成分分析

团聚体影响因子较多, 而且各因素之间也相互影响, 为了筛选出产生影响的主要因子群, 对 11 个指标进行主成分分析, 其结果见表 6。

表 6 主成分分析特征根与方差贡献率

Table 6 The eigenvalues and percentages of principal components analysis

地点 Location	项目 Item	第一主成分 1st PC	第二主成分 2nd PC	第三主成分 3rd PC
云雾山	特征根	6.30827	1.7911	1.46441
	方差贡献率	57.34792	16.28275	13.31282
	累积方差贡献率	57.34792	73.63066	86.94348

表 6 是供试土壤主成分的特征根和方差贡献率, 其中特征根指的是累积方差贡献, 可以看出, 第一主成分对土壤团聚体的贡献最大, 加上第二主成分和第三主成分方差贡献率, 其累积方差贡献率大于 85%。根据主成分分析原理, 当累积方差贡献率大于 85% 时, 则可用基本反应系统的变异信息, 因而说明用第一、

第二、第三主成分这三个指标就能代表土壤影响因子系统内的变异信息。取前三个主成分:

$$Y_1 = 0.331X_1' + 0.3760X_2' + 0.3384X_3' + 0.3763X_4' + 0.3732X_5' + 0.3828X_6' \\ + 0.0379X_7' + 0.2648X_8' + 0.2561X_9' + 0.1474X_{10}' - 0.2245X_{11}' \\ Y_2 = -0.1417X_1' + 0.0596X_2' + 0.2954X_3' - 0.04867X_4' - 0.0598X_5' \\ - 0.0723X_6' - 0.3552X_7' - 0.2386X_8' + 0.2283X_9' + 0.562X_{10}' + 0.5717X_{11}' \\ Y_3 = -0.1904X_1' + 0.0538X_2' - 0.0984X_3' - 0.1784X_4' - 0.2133X_5' \\ + 0.1182X_6' + 0.6554X_7' + 0.2585X_8' - 0.3620X_9' + 0.4353X_{10}' + 0.2073X_{11}'$$

土壤影响因子的第一主成分均匀地综合了土壤全铝、全铁、碳酸钙、全氮、有机质、全氮的变异信息,第二主成分主要综合了粘粒、物理性粘粒的变异信息,第三主成分则综合了土壤 pH 值、阳离子交换量的变异信息。第一主成分包括土壤养分中最主要的有机质和全氮,是影响团聚体稳定性综合化学因子。铁铝氧化物也是土壤中重要的影响因子,尽管其在研究区土壤剖面上风化淋溶不明显,但其对团聚体稳定性的作用依然强烈,可以认为是影响团聚体的综合矿质因子。第二主成分主要是土壤物理性质的代表性因子物理性粘粒和粘粒两个重要因子,是影响团聚体稳定性的综合物理因子。

### 3 结 论

(1)各植被演替阶段土壤团粒以 > 5mm 团聚体含量为主,各层次基本上占到 50% 左右。在剖面分布上,土壤发育程度较好的大羽茅群落与长芒草群落团聚体含量最高的层次是在土体的中下部。铁杆蒿群落、百里香群落、香茅草群落条件下, > 5mm 土壤团聚体在剖面上的分布则是随土层深度增加而逐渐降低的趋势。 > 0.25mm 土壤团聚体含量在 2m 深土层土壤团聚体的加权平均值的比较结果为:大羽茅 > 长芒草 > 铁杆蒿 > 百里香 > 香茅草群落,而且含量差别在 4~6 倍,在植被演替的初级阶段,土壤团聚体含量受有机质影响较大,但在有机质含量较高的条件下,土壤粘粒含量及铁铝氧化物对团聚体含量有影响。

(2) > 0.25mm 土壤团聚体总量与全氮、有机质、粘粒、物理性粘粒呈极显著的正相关关系,与全铁、全磷和阳离子交换量呈显著相关。与碳酸钙含量和 pH 值呈现负相关关系,但不显著。通径分析进一步确定了各个因子对团聚体的作用大小及方向,物理性粘粒和有机质是影响团聚体总量的重要影响因素。

(3)主成分分析表明:全铝、全铁、全氮、有机质是影响土壤团聚体的主要因子群,其次为粘粒、物理性粘

粒。主要作用因子可划分为综合物理因子(物理性粘粒、粘粒)、综合化学因子(全氮、有机质)、综合矿质因子(铁、铝氧化物)。

### 参考文献:

- [1] E Amezketa. Soil aggregate stability: a review [J]. Journal of sustainable agriculture, 1999, 14(2/3): 83-151.
- [2] 孙波,张桃林,赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土土壤肥力的演化——I 物理学肥力的演化 [J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 35-47.
- [3] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展 [J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- [4] Shinjo H, Fujita H, Gintzburger G. Soil aggregate stability under different landscapes and vegetation types in a semi-arid area in Northeastern Syria [J]. Soil Sci Plant Nutr, 2000, 46(1): 229-240.
- [5] 刘国彬. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程. II. 植被恢复不同阶段土壤抗冲性特征 [J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 122-128.
- [6] Neufeldt H, Ayazma A, Resck D V S, et al. Distribution of water-stable aggregates and aggregating agents in Cerrado Oxisols [J]. Geoderma, 1999, 93(1/2): 85-99.
- [7] Cammeraat L H, Ineson. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France [J]. geomorphology, 1998, 23: 307-321.
- [8] Wright S F, Starf J L, Paltineanu I C. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage transition [J]. Soil Sci Soc Am. J., 1999, 63, 1825-1829.
- [9] 吴彦,刘世全,付秀琴. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49.
- [10] 袁志发,周静宇主编. 多元统计分析 [M]. 科学出版社, 2002, 北京.
- [11] 和文祥,朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析 [J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 392-398.
- [12] 刘广深,徐冬梅,许中坚. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系 [J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 756-762.
- [13] 邹厚远,关秀琦. 云雾山草原自然保护区的管理途径探讨 [J]. 草业科学, 1997, 14(1): 3-4.
- [14] 南京农业大学主编. 土壤农化分析 [M]. 农业出版社, 1985.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海科学技术出版社, 1981.
- [16] 魏朝富,谢德体,李保国. 土壤有机无机复合体的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 221-227.
- [17] 史奕,陈欣,沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1491-1494.
- [18] 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.

## Characteristics of Soil Water Stable Aggregates and Relationship with Soil Properties During Vegetation Rehabilitation in a Loess Hilly Region

AN Shao-shan<sup>1</sup>, HUANG Yi-mei<sup>2</sup>, LIB i-cheng<sup>1</sup>, YANG Jian-guo<sup>3</sup>

(1 *Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100 China;*

2 *Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;*

3 *Institute of agricultural resource and environment, Ningxia academy of agriculture and forestry, Yinchuan 750002, China* )

**Abstract** Based on the field investigation and lab analysis, we studied the characteristics of soil water-stable aggregates and soil properties during vegetation rehabilitation in typical grassland of hilly-gullied Loess area and analyze the relationship between them by path analysis and main component analysis. The results show that: In terms of vegetation succession stages, the contents of big gravel soil water-stable aggregates increased, the > 5mm aggregate is priority in different layers, about 50% - 80%. The 5-2mm aggregate is the second main component. The mean values of > 5mm aggregate in 2m layers show that *Stipa gradiss* Community > *Stipa bungana Trin* Community > *Artemisia sacrorum Ledeb* community > *Thymus mongolicus Ronn* community > *Hierochbe ordo rata* community. Physical clay, organic matter and total nitrogen are the key factors that influenced the total water-stable aggregates.

**Key words** Soil aggregates; Soil properties; Path analysis; Principal components analysis