

曹立悦,李玉霖,詹瑾,等.开垦对科尔沁沙地土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):212-220.

开垦对科尔沁沙地土壤团聚体分布及稳定性的影响

曹立悦¹,李玉霖²,詹瑾^{2,3},石丽娜²

(1.西北师范大学 地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站,甘肃 兰州 730000; 3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:选取科尔沁地区不同开垦年限玉米田,以沙质草地为对照,采用湿筛法测定了0—40 cm土壤各粒径团聚体分布状况,以大于0.25 mm水稳性团聚体的含量($W_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)和土壤可蚀性因子(K)为稳定性评价指标,研究随着开垦年限和土层深度变化下土壤水稳性团聚体的含量变化及稳定性差异。结果表明:(1)开垦对土壤水稳性团聚体含量产生了显著的影响,在不同土层呈现出一致性规律,整体上表现为随开垦年限增加,团聚体含量呈现“N”型态势;(2)开垦15—20 a土壤团聚体的 $W_{0.25}$ 、MWD和GMD值均高于其他开垦年限, D 、 K 则相反,且上层团聚体稳定性优于下层;(3)相关分析表明,大于1 mm粒径的土壤团聚体含量与 $W_{0.25}$ 、MWD、GMD极显著正相关($P<0.01$),而与0.5—0.25 mm、<0.25 mm粒径团聚体含量、 D 和 K 极显著负相关($P<0.01$)。开垦活动提高了科尔沁地区土壤团聚体稳定性,开垦15—20 a的土壤抗侵蚀力较强,大于20 a的开垦可能会导致土地退化,应考虑通过采取保护性耕作措施等方式实现该地区土壤可持续健康发展;大于1 mm的水稳性团聚体含量可以作为评价该区域土壤质量的重要参数。

关键词:水稳性团聚体;开垦年限;粒径分布;团聚体稳定性

文章编号: 1000-694X(2021)02-212-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00131

中图分类号: S152.3

文献标志码: A

0 引言

团聚体作为土壤结构的基本单元^[1],其粒径分布和质量在协调土壤中水肥气热的平衡^[2]、维持土壤微生物和酶的活性^[3-4]以及稳定土壤熟化层^[5]等方面发挥着重要的作用。土壤团聚体的形成过程非常复杂,其稳定性受土壤母质^[6]、耕作措施^[7]、施肥水平^[8]和气候条件^[9]等多重因素的影响。其中,水稳性团聚体的数量和稳定性是制约土壤抗蚀性的重要因子^[10]。近年来,国内外学者围绕土地利用方式^[11-12]、施肥^[8,13]、种植年限^[14-15]和保护性耕作^[16-17]等对土壤团聚体的影响开展了大量研究,并取得了丰硕的成果。但这些研究集中于黑土^[8]、紫色土^[18]和红壤^[19]等团聚结构较好的土壤,较少涉及团聚结构较差的沙地土壤,且有关开垦年限对土壤水稳性

团聚体组成及稳定性的研究还很有限。

科尔沁地区生态环境脆弱,受自然因素和不合理的人类活动的叠加影响,土壤调控能力减弱。该区农民土地保护意识普遍薄弱,长期的“重用轻养”以致土壤水稳性团聚体收支失衡,使作物生长有效耕层日益浅薄化,导致土壤的蓄水保墒能力严重不足^[20]。良好、稳定的土壤团粒结构,不仅直接关系到土壤接纳和储存雨水及营养物质的能力,而且与土壤抗蚀性紧密联系^[21]。本研究以玉米田为研究对象,以沙质草地为对照,分析不同开垦年限的玉米田土壤及草地土壤团聚体粒径分布组成、稳定性及变化趋势,从团聚体尺度揭示农田开垦对土壤质量的影响,以期为科尔沁地区优化调控土壤抗蚀能力和生态恢复提供理论依据,这对于实现该区人与自然和谐可持续发展具有重要意义。

收稿日期:2020-12-23; 改回日期:2020-12-30

资助项目:内蒙古自治区科技计划项目(201601052); 国家重点研发计划项目(2016YFC0500907)

作者简介:曹立悦(1995—),女,河南安阳人,硕士研究生,主要从事土壤团聚体相关研究。E-mail: 1510473925@qq.com

通信作者:李玉霖(E-mail: liyl@lzb.ac.cn)

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古通辽市奈曼旗尧勒甸子村,地处中国北方半干旱农牧交错带东部的科尔沁沙地腹地。地理位置 42.3° — 44.5° N、 113.5° — 123.5° E,平均海拔350 m,属大陆性半干旱气候。年均气温 5.8 — 6.4°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $3\,000$ — $3\,200^{\circ}\text{C}$,无霜期 140 — 160 d,年降水量 343 — 451 mm,集中在夏季,年蒸发量 $1\,500$ — $2\,500$ mm,年平均风速 3.5 — 4.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,大风日数 25 — 40 d。研究区土壤以退化砂质栗钙土为主,特点是养分含量低和保水保肥性能差^[22]。农田大多位于沙质草甸或坨间缓坡地,沙质属性决定了土壤易遭受风蚀,尤其在地表裸露、干旱多风的春季,风蚀更为强烈。土壤的机械组成中粒径为 1 — 0.25 mm的粗砂占 20% — 58% ,粒径为 0.25 — 0.05 mm的细砂占 40% — 67% ,粒径 <0.05 mm的黏粉粒占 0.1% — 15% 。该区土壤有机质含量低,不到 0.5% ^[23]。

1.2 试验设计

在参阅相关资料的基础上进行详实的野外调查,选取开垦年限为 0 — 5 、 5 — 10 、 10 — 15 、 15 — 20 、 20 — 25 、 25 — 30 、 30 — 35 、 35 — 40 a共8个梯度的玉米田,施肥方式均为化肥+有机肥(牛粪、羊粪),灌溉方式为漫灌,生长季浇水 5 — 8 次,每个梯度选取5块样地,为比较开垦对沙地团聚体的影响,在每个样点附近对应采集沙质草地土样作为对照,其中耕地每个样地的面积为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$,草地为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 。于2019年8月下旬至9月上旬采样,分别在每个选定的样地上(均在长势良好的玉米植株下取土)挖取3个剖面,剖面深度为 40 cm,在每个剖面按 0 — 10 、 10 — 20 、 20 — 40 cm逐层环刀采集原状土样,放于硬制塑料盒内带回实验室,按其自然结构轻轻地掰成直径 1 — 2 cm的小块,剔除大的石砾、植物残体后自然风干。在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动,以免破坏土壤团聚体。

水稳性团聚体的测定采用湿筛法^[24]。利用国产TTF-100型土壤团聚体分析仪进行测试,称取 50 g 风干土,套筛孔径依次为 1.0 、 0.5 、 0.25 mm,蒸馏水充分浸润后(在整个套筛处于最上端时,最顶

层筛的土样保持被水淹没),每组样品以 $30\text{次}\cdot\text{min}^{-1}$ 分析 5 min 后收集各级筛子上的团聚体并分别转移至已知重量的铝盒,于 50°C 下烘干,称量。将小于 0.25 mm 的部分称为水稳性微团聚体,大于 0.25 mm 的部分称为水稳性大团聚体^[25]。

1.3 数据处理与分析

本研究选用各粒级水稳性团聚体含量、大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量($W_{0.25}$)、平均重量直径(MWD, mm)、几何平均直径(GMD, mm)、分形维数(D)和土壤可蚀性因子(K)来描述团聚体稳定性特征^[24,26-28]。

$$W_{0.25} = \frac{M_{i>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3)$$

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

两边分别取以10为底的对数:

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right) \quad (5)$$

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \exp \left[(-0.5) \times \left(\frac{\lg GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

式中: $M_{i>0.25}$ 为粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体的质量(g); M_T 为水稳性团聚体的总质量(g); \bar{x}_i 为两筛分粒级间水稳性团聚体的平均直径(mm); w_i 为各粒级水稳性团聚体质量百分数(%); $M(r < \bar{x}_i)$ 为直径小于 \bar{x}_i 的水稳性团聚体累计质量(g); x_{\max} 为水稳性团聚体的最大直径(mm)。

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 16.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。利用Pearson法进行相关分析。利用Origin 8.5.1软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同开垦年限下土壤水稳性团聚体的分布特征

开垦措施改变了土壤水稳性团聚体组成,与对照相比,不同开垦年限的各土层水稳性大团聚体均增加(表1)。把40 a划分为0—20、20—40 a两段。0—10 cm土层中,土壤团聚体以大于1 mm和<0.25 mm粒径为主,1—0.25 mm团聚体含量在不同年限无显著差异,0—20 a,随着开垦年限的增加,

>1 mm水稳性团聚体随之增加,在15—20 a达到最大值55.15%,较开垦0—5 a增长了148%,较对照增长了21%,<0.25 mm粒径的团聚体变化趋势则相反,在15—20 a最小(36.83%),开垦20 a后大团聚体含量开始下降,在30 a后又有略微上升,1—0.25 mm粒径的团聚体含量变化不显著。10—20 cm土层中,不同开垦年限团聚体含量变化与0—10 cm土层类似,团聚体粒径分布呈现“两头大中间小”的规律,>1 mm团聚体在15—20 a达到峰值59.69%,但20 a之后转为下降趋势。20—40 cm土层中,<0.25 mm

表1 不同开垦年限土壤水稳性团聚体粒径分布

Table 1 Distribution characteristics of soil water-stable aggregates under different tillage period

土层深度/cm	开垦年限/a	团聚体含量/%							
		>1 mm		1—0.5 mm		0.5—0.25 mm		小于0.25 mm	
		开垦	对照	开垦	对照	开垦	对照	开垦	对照
0—10	0—5	22.23±0.02 ^{Ha}	23.26±0.19 ^b	3.92±0.02 ^{Ca}	1.22±0.01 ^b	11.03±0.02 ^{Aa}	3.76±0.01 ^b	62.83±0.04 ^{Aa}	71.77±0.19 ^b
	5—10	29.58±0.00 ^{Fa}	27.19±0.09 ^b	1.53±0.00 ^{Ga}	1.38±0.01 ^b	8.05±0.02 ^{Ca}	3.80±0.02 ^b	60.84±0.02 ^{Ba}	67.63±0.08 ^b
	10—15	28.21±0.16 ^{Ga}	18.40±0.12 ^b	3.88±0.00 ^{Da}	2.03±0.01 ^b	8.04±0.02 ^{Ca}	6.58±0.04 ^b	59.88±0.16 ^{Ca}	73.00±0.12 ^b
	15—20	55.15±0.03 ^{Aa}	45.76±0.16 ^b	2.24±0.01 ^{Fa}	1.27±0.01 ^b	5.78±0.02 ^{Da}	2.65±0.01 ^b	36.83±0.01 ^{Ha}	50.32±0.16 ^b
	20—25	46.67±0.01 ^{Ba}	36.12±0.07 ^b	2.83±0.01 ^{Ea}	2.15±0.00 ^b	5.69±0.01 ^{Ea}	4.41±0.02 ^b	44.81±0.02 ^{Fa}	57.32±0.05 ^b
	25—30	30.59±0.03 ^{Ea}	22.53±0.17 ^b	4.06±0.01 ^{Ba}	2.59±0.01 ^b	8.95±0.00 ^{Ba}	5.98±0.03 ^b	56.41±0.04 ^{Da}	68.90±0.15 ^b
	30—35	39.72±0.15 ^{Da}	30.99±0.08 ^b	6.72±0.01 ^{Aa}	3.30±0.01 ^b	2.83±0.00 ^{Fa}	4.33±0.02 ^b	50.73±0.15 ^{Ea}	61.39±0.10 ^b
	35—40	47.95±0.01 ^{Ca}	33.40±0.19 ^b	3.91±0.01 ^{Ca}	2.31±0.01 ^b	5.70±0.01 ^{Ea}	4.31±0.02 ^b	42.44±0.02 ^{Ga}	59.98±0.18 ^b
10—20	0—5	32.35±0.02 ^{Ca}	11.06±0.11 ^b	2.13±0.01 ^{Ea}	1.19±0.00 ^b	7.34±0.01 ^{Ea}	7.62±0.04 ^b	58.18±0.02 ^{Ca}	80.13±0.15 ^b
	5—10	32.10±0.03 ^{Da}	22.81±0.10 ^b	1.76±0.01 ^{Ga}	1.08±0.01 ^b	9.08±0.02 ^{Ba}	4.19±0.04 ^b	57.06±0.04 ^{Ea}	71.92±0.09 ^b
	10—15	31.97±0.15 ^{Ea}	6.16±0.06 ^b	2.56±0.01 ^{Da}	1.74±0.01 ^b	8.78±0.00 ^{Da}	6.32±0.03 ^b	56.68±0.15 ^{Fa}	85.78±0.05 ^b
	15—20	59.69±0.04 ^{Aa}	23.71±0.11 ^b	1.26±0.00 ^{Ha}	1.68±0.00 ^b	4.62±0.00 ^{Ha}	5.03±0.02 ^b	34.43±0.03 ^{Ha}	69.58±0.10 ^b
	20—25	29.61±0.07 ^{Fa}	21.65±0.16 ^b	4.21±0.02 ^{Aa}	2.10±0.01 ^b	7.27±0.03 ^{Fa}	4.56±0.02 ^b	58.91±0.08 ^{Ba}	71.70±0.15 ^b
	25—30	22.48±0.09 ^{Ga}	14.39±0.18 ^b	2.95±0.00 ^{Ca}	2.14±0.01 ^b	9.70±0.03 ^{Aa}	7.67±0.05 ^b	64.88±0.09 ^{Aa}	75.80±0.15 ^b
	30—35	29.52±0.05 ^{Fa}	25.84±0.01 ^b	3.41±0.01 ^{Ba}	2.42±0.00 ^b	9.02±0.01 ^{Ca}	4.09±0.01 ^b	58.05±0.04 ^{Da}	67.65±0.02 ^b
	35—40	42.74±0.02 ^{Ba}	30.91±0.16 ^b	1.98±0.00 ^{Fa}	1.30±0.01 ^b	5.35±0.01 ^{Ga}	4.26±0.02 ^b	49.93±0.01 ^{Ga}	63.52±0.18 ^b
20—40	0—5	2.02±0.00 ^{Ha}	3.20±0.04 ^b	5.96±0.00 ^{Ba}	1.58±0.00 ^b	6.46±0.01 ^{Ha}	7.03±0.00 ^b	85.56±0.01 ^{Aa}	88.19±0.04 ^b
	5—10	9.75±0.01 ^{Ga}	10.91±0.13 ^b	3.10±0.02 ^{Ea}	1.52±0.02 ^b	8.89±0.01 ^{Da}	6.90±0.03 ^b	78.25±0.04 ^{Ba}	80.68±0.11 ^b
	10—15	10.57±0.08 ^{Fa}	1.72±0.02 ^b	2.43±0.01 ^{Ga}	1.72±0.01 ^b	11.96±0.01 ^{Ba}	4.89±0.02 ^b	75.04±0.09 ^{Ca}	91.67±0.04 ^b
	15—20	28.42±0.02 ^{Ba}	7.58±0.05 ^b	13.19±0.02 ^{Aa}	3.00±0.01 ^b	13.16±0.02 ^{Aa}	5.81±0.01 ^b	45.23±0.03 ^{Ha}	83.61±0.05 ^b
	20—25	25.25±0.01 ^{Ca}	9.09±0.10 ^b	3.65±0.00 ^{Ca}	2.33±0.00 ^b	11.05±0.02 ^{Ca}	5.09±0.01 ^b	60.05±0.01 ^{Fa}	83.49±0.11 ^b
	25—30	19.14±0.00 ^{Da}	5.70±0.04 ^b	3.10±0.00 ^{Ea}	2.73±0.02 ^b	6.49±0.00 ^{Ga}	6.87±0.03 ^b	71.27±0.00 ^{Da}	84.70±0.05 ^b
	30—35	19.05±0.01 ^{Ea}	15.70±0.14 ^b	3.38±0.01 ^{Da}	2.64±0.01 ^b	7.61±0.02 ^{Fa}	4.91±0.02 ^b	69.96±0.03 ^{Ea}	76.75±0.14 ^b
	35—40	38.34±0.01 ^{Aa}	18.73±0.10 ^b	2.78±0.00 ^{Fa}	1.98±0.01 ^b	7.88±0.00 ^{Ea}	5.10±0.02 ^b	51.00±0.01 ^{Ga}	74.19±0.11 ^b

不同大写字母表示不同开垦年限间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示开垦与其对照间差异显著($P<0.05$)。

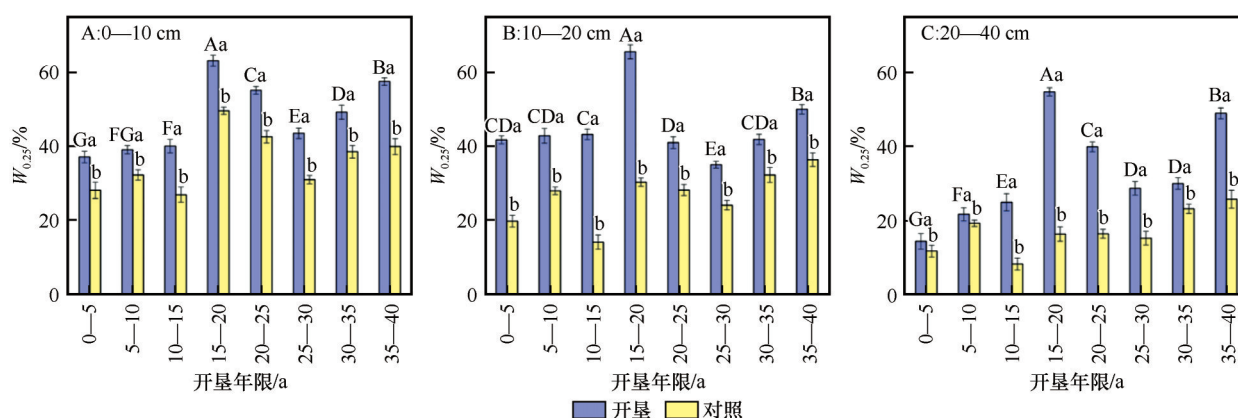
粒径的微团聚体占据优势级别,占45.23%—85.56%,>1 mm的部分同样在15—20 a最多28.42%,0.5—0.25 mm粒径的团聚体略多于0—20 cm土层,不同开垦年限土壤大团聚体含量均低于0—20 cm,变化趋势同0—20 cm。由此可知,大团聚体含量受耕作控制,在科尔沁地区,开垦活动促进了水稳性大团聚体的形成,且随着开垦年限的增加呈现“N”型变化态势,大于20 a的开垦不利于土壤水稳性大团聚体的形成和保持。

2.2 不同开垦年限下土壤水稳性团聚体的稳定性

与对照相比,不同开垦年限的各土层 $W_{0.25}$ 均显著增加 ($P<0.05$, 图1), 0—10 cm 增加了27.16%—48.59%, 10—20 cm 增幅为29.68%—205%, 20—40 cm 增长了12.54%—234%。仍然把40 a分为两段考虑。0—10 cm 土层中, 0—20 a 内, 随着开垦年限的增加, $W_{0.25}$ 增加, 在开垦15—20 a 达到峰值63.17%,

20 a 后呈现“V”型态势, 10—20 cm 和 20—40 cm 土层中 $W_{0.25}$ 变化规律与 0—10 cm 类似, 都在15—20 a 最大, 分别为65.57%和54.77%。从土壤剖面来看, $W_{0.25}$ 随土层深度增加而减少。

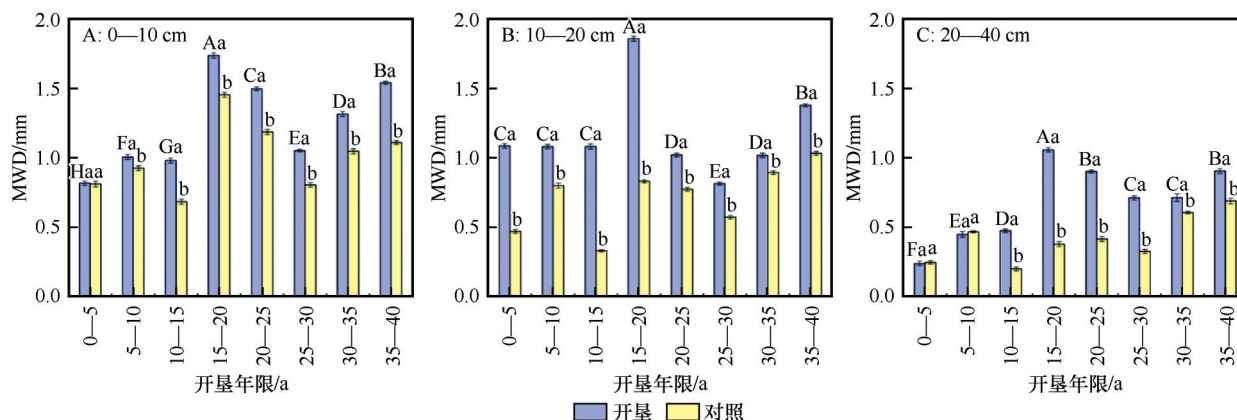
不同开垦年限团聚体MWD和GMD表现出相似的变化趋势(图2, 3)。开垦10 a后, 不同土层耕地与对照间MWD、GMD差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。0—10 cm 土层中, 开垦0—15 a 内MWD、GMD较低, 分别为0.82—1.01 mm和0.31—0.36 mm, 最高值出现在15—20 a, 分别为1.74 mm和0.80 mm, 20 a后随着开垦年限增加呈现“V”型变化。10—20 cm 土层中, 开垦0—15 a, MWD、GMD变化均不显著 ($P<0.05$), 15—20 a 激增, 分别为1.86、0.90 mm, 其他年限分别为0.81—1.38 mm和0.30—0.53 mm。20—40 cm 土层中, 0—15 a, MWD随着开垦年限增加而显著增大 ($P<0.05$), GMD则不显著 ($P<0.05$), 最大值同样出现在15—20 a, 分别为1.06 mm和0.45 mm, 其他



不同大写字母表示不同开垦年限间差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示开垦与其对照间差异显著 ($P<0.05$)

图1 不同开垦年限>0.25 mm水稳性团聚体含量 ($W_{0.25}$)

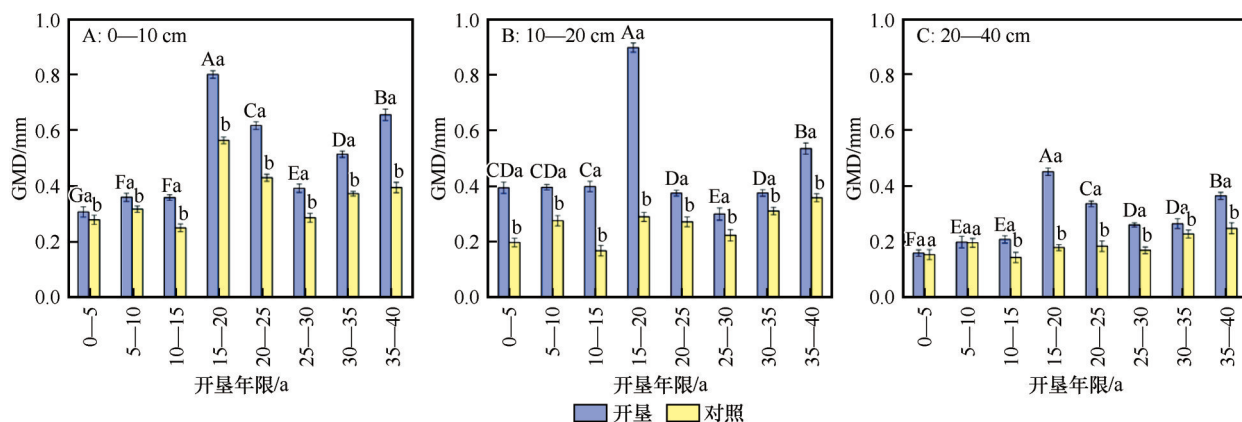
Fig.1 The content of soil aggregates of >0.25 mm ($W_{0.25}$) under different tillage period



不同大写字母表示不同开垦年限间差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示开垦与其对照间差异显著 ($P<0.05$)

图2 不同开垦年限土壤团聚体平均重量直径(MWD)

Fig.2 Mean weight diameter of soil aggregates (MWD) under different tillage period



不同大写字母表示不同开垦年限间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示开垦与其对照间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同开垦年限土壤团聚体几何平均直径(GMD)

Fig.3 Geometric mean diameter of soil aggregates (GMD) under different tillage period

年限相对较低。从土壤剖面来看,不同开垦年限的MWD、GMD值在0—20 cm高于20—40 cm。

除10—20 cm土层中15—20 a开垦与对照间差异显著 ($P < 0.05$, 图4)外,其余土层不同年限开垦D值均略小于草地。0—10 cm土层中,不同开垦年限D值2.66—2.87,15—20 a最小,较开垦0—5 a降低了7.51% ($P < 0.05$)。10—20 cm土层中,不同开垦年限D值2.62—2.88,15—20 a最小,比对照降低了8.99% ($P < 0.05$)。20—40 cm土层中,不同开垦年限D值2.80—2.97,15—20 a仍然最小,较开垦0—5 a降低了5.76% ($P < 0.05$)。总体而言,开垦15—20 a的耕地在各土层稳定性均较好,稳定性10—20 cm > 0—10 cm > 20—40 cm。

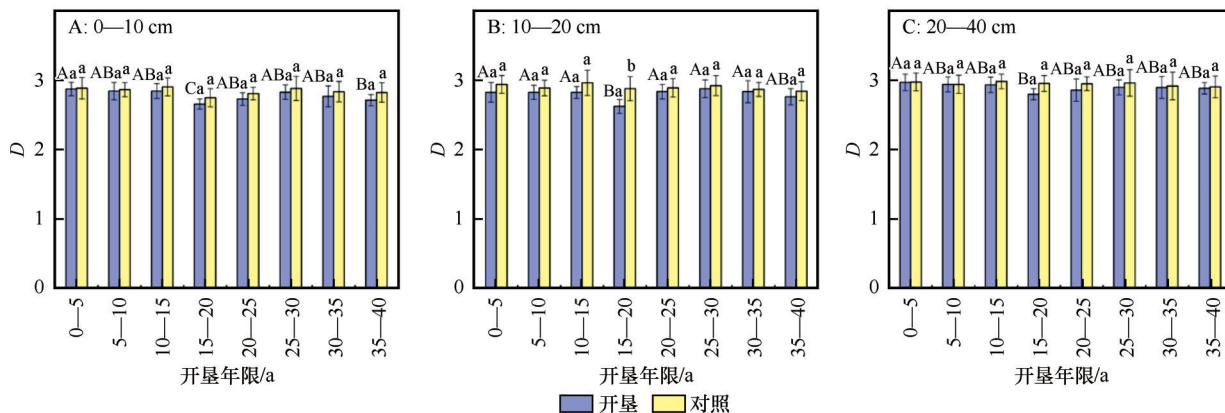
与对照相比,各土层不同开垦年限耕地K值均小于草地,且除20—40 cm土层0—10 a外,均达显著水平 ($P < 0.05$, 图5)。0—10 cm土层中,K值随开垦年限的增加呈现波动式变化,在开垦15—20 a最

小,为0.04,较对照减少了29.30%。10—20 cm和20—40 cm土层中,K值变化趋势和0—10 cm相似,均在15—20 a最小,分别较对照减少66.53%、55.88%,这说明该开垦年限土壤抗蚀性较强。从土壤剖面来看,土壤可蚀性K值在0—20 cm比20—40 cm小。

结合 $W_{0.25}$ 、MWD、GMD、D和K的变化特征来看,开垦15—20 a的团聚体稳定性、土壤抗蚀性高于其他年限,大于20 a的开垦不利于土壤结构的保持,且土壤结构稳定性0—20 cm > 20—40 cm。

2.3 土壤水稳性团聚体含量与团聚体稳定性指标的相关性

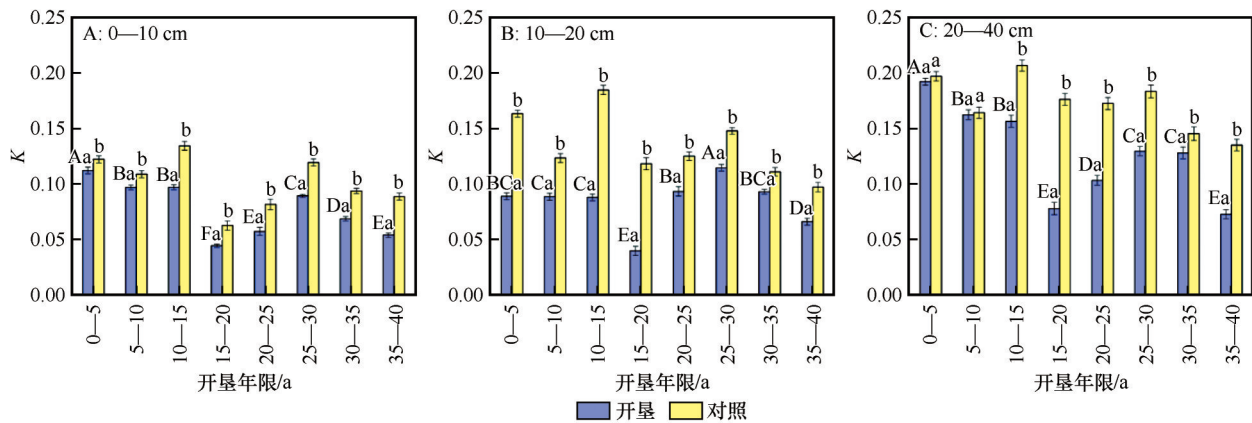
>1 mm粒径的土壤团聚体与 $W_{0.25}$ 、MWD、GMD呈极显著正相关 ($P < 0.01$, 表2),而与0.5—0.25 mm、<0.25 mm粒径团聚体、D、K呈极显著负相关 ($P < 0.01$),这说明>1 mm粒级团聚体可作为该区土壤



不同大写字母表示不同开垦年限间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示开垦与其对照间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同开垦年限土壤团聚体分形维数(D)

Fig.4 Fractal dimension of soil aggregates (D) under different tillage period



不同大写字母表示不同开垦年限间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示开垦与其对照间差异显著($P<0.05$)

图 5 不同开垦年限土壤可蚀性因子(K)

Fig.5 K of soil erosibility factor under different tillage period

表 2 各粒级水稳性团聚体含量与团聚体稳定性指标的相关性

	>1 mm	1—0.5 mm	0.5—0.25 mm	<0.25 mm	$W_{0.25}$	MWD	GMD	D	K
>1 mm	1								
1—0.5 mm	-0.204	1							
0.5—0.25 mm	-0.530**	0.298	1						
<0.25 mm	-0.961**	-0.024	0.335	1					
$W_{0.25}$	0.961**	0.024	-0.335	-1.000**	1				
MWD	0.999**	-0.164	-0.511*	-0.972**	0.972**	1			
GMD	0.857**	-0.090	-0.493*	-0.963**	0.963**	0.968**	1		
D	-0.987**	0.108	0.508*	0.969**	-0.969**	-0.990**	-0.967**	1	
K	-0.982**	-0.253	0.267	0.979**	-0.979**	-0.987**	-0.958**	0.977**	1

*表示在 0.05 水平上显著相关,**表示在 0.01 水平上显著相关。

团聚体水稳性的重要阈值; $W_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 之间均呈极显著正相关($P<0.01$),与 D 和 K 极显著负相关($P<0.01$); D 、 K 、<0.25 mm 粒径团聚体呈极显著正相关($P<0.01$), D 与 0.5—0.25 mm 显著正相关($P<0.05$)。或受样本数量与研究尺度限制,1—0.5 mm 粒径团聚体与 $W_{0.25}$ 、MWD、GMD、 D 及 K 均未表现出相关性。以上表明土壤团聚体的稳定性和 >1 mm 粒径和 <0.25 mm 的团聚体含量关系密切, $W_{0.25}$ 、MWD、GMD、 D 及 K 均能较好地表现土壤水稳性团聚体稳定性特征。

3 讨论

3.1 开垦年限对土壤水稳性团聚体分布的影响

土壤水稳性团聚体不同粒径配比是衡量土壤

结构优劣的重要参照。本研究中,和对照相比,不同年限的开垦均显著增加了土壤水稳性大团聚体含量,与刘文利等^[14]研究结果一致,说明开垦对科尔沁地区的土地质量恢复起到了促进作用,可能由于外源有机质的输入提高了大团聚体含量^[29],并且农作物根系固结土壤,也会提高大团聚体含量^[30]。但在开垦 20 a 后,土壤团聚体表现出由大粒径为主向小粒径为主的趋势,土壤表现出明显的“疲劳”状态,说明大于 20 a 的开垦不利于土壤结构的保持,这可能因为频繁耕作导致土壤结构变差,使受团聚体保护的有机质矿化,减少了稳定性胶结剂的产生,加速了大团聚体的周转,提高了微生物的比呼吸速率,最终导致土壤团聚体的分解^[31]。开垦 30 a 后大团聚体比例又略微上升,可能由于长期施肥使土壤中有机质含量整体上得到了提高^[32]。从土壤剖面

来看,不同开垦年限表层大团聚体含量均高于深层,与朱家琪等^[33]研究结果一致,这可能是耕作活动主要发生在地表,使表层土壤经受干湿循环和冻融循环影响,改变了土壤状况(例如温度、湿度和通气性),增加了凋落物的分解速率^[34],对深层土壤的影响相对较弱,且作物残茬、肥料聚集在地表,土壤动物和微生物在地表将其分解。许多研究表明,连续保护性耕作可提高大粒级水稳性团聚体含量^[16];杜静等^[30]研究证实玉米/马铃薯间作可通过增加玉米根系分泌总糖和总有机酸含量促进土壤团粒结构形成。此外,草地经开垦后,施肥增加了部分有机碳氮的输入,在一定程度上提高了大团聚体的形成^[8],由此推测,科尔沁沙地团聚度差的原因可能是土壤碳氮的枯竭。Sodhi等^[35]研究表明长期化肥配施有机肥可显著地提高水稳性大团聚体的含量,顾鑫等^[17]发现玉米秸秆还田驱动中小粒径团聚体向大粒径团聚体胶结。因此,可以考虑采取免耕、间作、施有机肥、秸秆还田等措施来改善土壤团聚结构。对于处于半干旱气候的科尔沁地区,还需通过长期追踪、定位分析以上措施对团聚体粒径分布的影响,这必将有助于提高该地区土壤质量,从而降低土壤侵蚀与荒漠化的程度。

3.2 不同开垦年限下土壤团聚体的稳定性指标

土壤水稳性团聚体的 $W_{0.25}$ 、MWD、GMD、 D 和 K 是反映土壤结构和土壤团聚体稳定性的重要指标^[8]。一般认为 $W_{0.25}$ 、MWD、GMD越大, D 、 K 越小,土壤团聚体稳定性越好,抗侵蚀力越强^[11]。本研究中,不同年限的开垦均增大了团聚体 $W_{0.25}$ 、MWD和GMD值,说明耕地土壤水稳性高于沙质草地,土壤结构稳定性和抗侵蚀性更强,可能是作物根系、凋落物和肥料的施入改善了原本贫瘠的沙地土壤^[36-37],这与玉米根系浸提液增强了土壤有机质和黏粒之间的联系,从而提高了大团聚体稳定性的结论^[37]相同。开垦15—20 a $W_{0.25}$ 、MWD和GMD值最大, D 最小,表明此开垦年限土壤稳定性最高,20 a后 $W_{0.25}$ 、MWD和GMD值呈现“V”型态势,可能是外加碳源供给不足所致^[29],大于20 a的开垦不利于土壤结构的维持。土壤水稳性团聚体的分形维数 D 在各个土层值域较小,与胡云锋等^[38]研究结果一致,开垦耕地均低于草地,且在不同土层间也呈现出相同规律:开垦15—20 a的 D 值显著低于其他年限($P<0.05$),表明开垦15—20 a的土壤稳定性较好,

大于20 a的开垦破坏了土壤结构; D 值在10—20 cm最小,可能是土壤的选择性侵蚀^[38]。土壤可蚀性 K 值与团聚体粒径分布有关,且微团聚体含量高时, K 值相应变大^[39],本研究中,开垦较未开垦草地土壤抗侵蚀能力强,可能由于该地区沙质草地植被盖度较低,地下根系少,大团聚体缺乏植物根系的缠绕易崩解^[40],而玉米的种植能有效增强该地区土壤的抗蚀能力,且灌溉施肥可以加快风沙土的成土进程^[41],开垦15—20 a土壤抗蚀力最强,与MWD、 D 等相一致。从土壤剖面来看,0—20 cm土层中 $W_{0.25}$ 、MWD、GMD大于20—40 cm,与王梦雪等^[42]研究结果一致,这可能与下层母质产生的土壤沙质结构有关,也可能由于水中弱集合体的破裂和内压的突然释放,破坏了不稳定的大集合体或胶结剂在水中的溶解而导致离子水化^[1], D 、 K 则相反,这说明上层土壤团聚体稳定性优于下层,或与存在冻融作用有关:冻融对下层土壤的影响大于表层,使得下层土壤中微团聚体含量升高^[34],且下层土有机质的输入和微生物的活动受到更多抑制^[3]。相关分析显示,团聚体稳定性指标与 >1 mm粒径团聚体含量间关系达极显著水平($P<0.01$),这和韩新生等^[11]研究结果一致,表明该部分占比对土壤结构的稳定性起到很大作用; $W_{0.25}$ 、MWD、GMD、 D 和 K 相互间呈现极显著相关关系($P<0.01$),与何绍浪等^[19]的研究结果一致,说明它们均是各粒径土壤团聚体含量的综合反映。前人研究表明,土壤有机质、土地利用方式、气候条件和管理措施等都会影响土壤水稳性团聚体稳定性^[43]。因此对于科尔沁地区半干旱的复杂特殊环境,土壤水稳性团聚体的形成与稳定性研究还需要进一步结合土壤质地、氧化还原条件^[33]等因素进行深入研究。

4 结论

开垦对科尔沁沙地土壤水稳性大团聚体的形成具有重要的作用,且随着开垦年限的增加,水稳性大团聚体含量呈现“N”型变化规律,微团聚体变化则相反。开垦提高了土壤团聚体稳定性,开垦15—20 a的土壤结构较好,20 a后土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力下降,且上层土壤团聚体稳定性优于下层。大于1 mm的水稳性团聚体含量可以作为评价科尔沁沙地土壤质量的重要参数, $W_{0.25}$ 、MWD、GMD、 D 和 K 均能较好地评价该区土壤团聚体的稳

定性。因此,在科尔沁地区,大于20 a的开垦可能会导致土地退化,应考虑通过采取保护性耕作措施、合理培肥和间作等方式来增强沙地土壤结构的稳定性,以实现该地区土壤可持续健康发展。

参考文献:

- [1] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 33 (2): 118–129.
- [2] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义 [J]. *土壤学报*, 1994(1): 18–25.
- [3] 文倩. 半干旱荒漠化地区不同土地利用方式下土壤团聚体微生物量与群落功能特性分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [4] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(9): 1625–1632.
- [5] Okolo C C, Gebresamuel G, Zenebe A, et al. Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 297: 106924.
- [6] 章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响 [J]. *热带亚热带土壤科学*, 1997(3): 198–202.
- [7] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱作农田土壤水稳性团聚体稳定性的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (3): 329–337.
- [8] 苑亚茹. 不同土地利用与施肥管理对黑土团聚体中有机碳的影响 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [9] Guan S, An N, Zong N, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 224–236.
- [10] Valmis S, Dimoyiannis D, Danalatos N G. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece [J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 80 (1/2): 139–147.
- [11] 韩新生, 马瑶, 郭永忠, 等. 土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(2): 114–120.
- [12] Arun J N, Rattan L A L. Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north appalachian region, USA [J]. *Pedosphere*, 2017, 27(1): 172–176.
- [13] Yilmaz E, Snmez M. The role of organic/bio-fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168: 118–124.
- [14] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 129–135.
- [15] 林诚, 郑祥洲, 郭宝玲, 等. 亚热带地区不同种植年限果园土壤团聚体结构及有机碳、氮分布特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(7): 1560–1566.
- [16] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22 (2): 141–145.
- [17] 顾鑫, 安婷婷, 李双异, 等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 243–247, 312.
- [18] 陈正发, 史东梅, 谢均强, 等. 紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(13): 2721–2729.
- [19] 何绍浪, 黄尚书, 钟义军, 等. 耕作深度对红壤坡耕地土壤水稳性团聚体特征的影响 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 127–132.
- [20] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地旱作农田土壤退化的过程和特征 [J]. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 25–28, 115.
- [21] Cantón Y A, Solé-Benet A C. Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion [J]. *Catena*, 2009, 77(3): 192–199.
- [22] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征 [J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 71–74.
- [23] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3537–3546.
- [24] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [25] 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.
- [26] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 759–768.
- [27] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. *科学通报*, 1993(20): 1896–1899.
- [28] Shirazi M A, Boersma L A. unifying quantitative analysis of soil texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48 (1): 142–147.
- [29] 何冰, 李廷亮, 栗丽, 等. 复垦土壤水稳性团聚体碳氮分布对施肥的响应 [J]. *天津农业科学*, 2019, 25(3): 43–49.
- [30] 杜静, 柏勇, 范茂攀, 等. 玉米/马铃薯间作根系特征及其与土壤水稳性团聚体关系 [J]. *山东农业科学*, 2020, 52(6): 57–64.
- [31] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter i. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 351–366.
- [32] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 369–373.
- [33] 朱家琪, 满秀玲, 王飞. 我国寒温带四种森林植被类型下土壤团聚体粒级组成及其稳定性比较研究 [J]. *土壤通报*, 2020, 51 (3): 606–613.
- [34] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1269–1274.
- [35] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-

- term application of compost in rice-wheat system [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 412–418.
- [36] Pohl M, Alig D, Krner C, et al. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems [J]. *Plant & Soil*, 2009, 324(1/2): 91–102.
- [37] Pojasok T, Kay B D. Effect of root exudates from corn and bromegrass on soil structural stability [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1990, 70(3): 351–362.
- [38] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 等. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征 [J]. *土壤学报*, 2005(2): 336–339.
- [39] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 黄土坡面结皮对土壤水稳性团聚体的稳定性和可蚀性的影响 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(18): 87–92.
- [40] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31.
- [41] 沈芳宇, 王永东, 李生宇, 等. 塔里木沙漠公路防护林土壤团聚体特征 [J]. *干旱区研究*, 2015, 32(5): 910–917.
- [42] 王梦雪, 李永梅, 酒鹃鹃, 等. 种植模式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 [J]. *广东农业科学*, 2020, 47(5): 52–59.
- [43] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review [J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3–22.

Effects of tillage on distribution and stability of soil aggregates in Horqin Sandy Land

Cao Liyue¹, Li Yulin², Zhan Jin^{2,3}, Shi Lina²

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China; 2. Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to find out the effects of tillage on the composition and stability of soil water-stable aggregates, this study analyzed distribution of aggregates with different particle sizes of corn fields with different tillage period and the sandy grassland nearby in the 0–40 cm soil layer by wet sieving method in Horqin area. The content of soil aggregates of >0.25 mm ($W_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D) and soil erodibility factor (K) were studied to explain the distribution and stability characteristics of water-stable aggregates under different tillage period and soil depth. The results showed that: (1) tillage exerted remarkable effects on the content of soil water-stable aggregates, the content of macro-aggregates presented an "N" type trend with the increase of tillage period, which was consistent in different soil layers. (2) $W_{0.25}$, MWD and GMD of soil aggregates in 15–20 years were higher than the others, while the D and K were opposite, the stability of the upper layer aggregates was better than that of the lower one. (3) Correlation analysis showed that soil aggregates content of >1 mm was significantly positively correlated with $W_{0.25}$, MWD and GMD ($P < 0.01$), but was negatively correlated with the aggregates content of 0.5–0.25 mm, <0.25 mm, D and K ($P < 0.01$). In summary, tillage activities enhanced the stability of soil aggregates in Horqin area, 15–20 years of tillage has strong anti-erodibility, and tillage of more than 20 years may lead to land degradation, conservation tillage should be considered to achieve sustainable and healthy development of soil. The water-stable aggregates content of >1 mm can be used as an important parameter to evaluate the soil quality in this area.

Key words: water-stable aggregate; tillage period; particle size distribution; soil aggregate stability