

# 氮肥处理下高寒草甸土壤水稳性团聚体的季节性变化特征

蒋胜竞<sup>1</sup>, 罗佳佳<sup>2,3</sup>, 金中财<sup>1</sup>, 石国玺<sup>4</sup>, 柴宇星<sup>1</sup>, 刘永俊<sup>1</sup>, 冯虎元<sup>1\*</sup>

(1. 兰州大学 生命科学学院, 甘肃 兰州 730000 2. 海南大学 热带农林学院 海南 海口 570228 3. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 农业部热带作物种质资源利用重点开放实验室 海南 儋州 571737 4. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态省级重点实验室, 青海 西宁 810008)

**摘要:**以青藏高原东缘高寒草甸为研究样地, 探究了氮肥添加下不同月份间土壤水稳性团聚体的组成差异。结果表明:各处理下土壤水稳性团聚体含量在 80.78% ~ 95.67% 之间, 平均重量直径(MWD)在 1.41 mm ~ 2.08 mm 之间。氮肥添加仅对土壤水稳性团聚体总量有影响, 对 MWD 与各级粒径团聚体含量影响均不显著。较氮肥添加而言, 采样月份对土壤水稳性团聚体总量及其粒径分布有着更为显著的影响。6 月份土壤水稳性团聚体以 2 ~ 4 mm 粒径团聚体为主, 7、8 月份则以 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体为主。土壤水稳性团聚体含量、MWD 及 > 1 mm 粒径的团聚体含量均随季节变化呈先降后升的趋势, 而 0.038 ~ 0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量则呈现相反的趋势。土壤有机碳和球囊霉素含量是影响土壤水稳性团聚体形成与稳定的关键土壤因子。本实验结果说明中度氮素的添加可降低土壤水稳性团聚体含量, 土壤水稳性团聚体在不同采样月份间处于破解与形成的动态变化中, 对青藏高原的施肥措施应充分考虑不同季节间土壤物理结构的差异。

**关键词:**施肥, 季节变化, 青藏高原, 土壤团聚体

中图分类号: S158.5 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2018)02-0329-07

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.02.10

蒋胜竞, 罗佳佳, 金中财, 石国玺, 柴宇星, 刘永俊, 冯虎元. 氮肥处理下高寒草甸土壤水稳性团聚体的季节性变化特征[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 329-335

JIANG Sheng-jing, LUO Jia-jia, JIN Zhong-cai, SHI Guo-xi, CHAI Yu-xing, LIU Yong-jun, FENG Hu-yuan. Seasonal Dynamic of Soil Water-stable Aggregates under Nitrogen Fertilization Treatments in an Alpine Meadow Ecosystem [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(2): 329-335

青藏高原分布有我国最大的天然高寒草地资源, 其中, 高寒草甸作为青藏高原地区主要的生态系统类型, 是当地发展畜牧业、提高牧民生活水平的基础。近几十年来, 频繁而剧烈的人类活动使得青藏高原生态系统植被退化、牧草产量大幅下降, 已严重阻碍了当地的社会、经济发展<sup>[1,2]</sup>。施肥因其可以快速提高土壤肥力、牧草产量, 是快速恢复草地经济服务功能的重要管理措施之一<sup>[3,4]</sup>。目前, 国内外学者在青藏高原地区施肥的研究主要集中于土壤养分状况、地上植物群落、地下微生物多样性等方面, 对土壤物理结构影响的研究相对较少。

土壤结构是由矿物微粒和有机物形成的不同尺度大小的多孔单位, 是维持土壤发挥生态功能的物质基础; 良好的土壤结构可以通过维持土壤孔隙度、导水率等调节生态系统的养分循环, 促进地上植物的生长<sup>[5]</sup>。水稳性团聚体是土壤物理结构的基本单元<sup>[6]</sup>, 由成土

母质、植物残体及根系分泌物在胶结物质的粘接作用下形成<sup>[7,8]</sup>。不同粒径的团聚体在土壤水分保持、可持续利用和营养循环等方面均具有重要作用, 在很大程度上决定了土壤的总体质量特征<sup>[9]</sup>。

已有研究表明适量的氮输入 ( $N\ 100\ kg\ hm^{-2}\ a^{-1}$ ) 可提高青藏高原土壤水稳性团聚体含量及其稳定性<sup>[10]</sup>, 氮素添加会通过提高土壤有效氮含量、影响土壤有机质的积累、改善植物与地下微生物的生长等途径影响土壤水稳性团聚体的形成。但土壤水稳性团聚体的形成受多种因素所影响, 植被类型、气候特点及土壤类型的差异均会造成土壤水稳性团聚体组成的差异。因此, 仍需在更多生态系统中开展施肥与土壤团聚体关系的系统研究。此外, 目前对不同生长季节间土壤水稳性团聚体组成是否存在差异这一科学问题尚未见报道。由于青藏高原不同生长季内土壤线虫、真菌等生物活性存在明显差异<sup>[11,12]</sup>, 但这些差异是否会影响土壤水稳

收稿日期: 2017-09-13; 修订日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(31570512, 31670433)资助

作者简介: 蒋胜竞(1988-), 男, 山东平邑人, 博士研究生, 主要从事土壤生态学的研究。E-mail: jiangshj13@zu.edu.cn

性团聚体的形成与稳定,我们还不得而知。基于此,探究施肥条件下土壤水稳性团聚体的季节性变化规律,不仅可以丰富青藏高原土壤结构的基础资料,还可以从土壤物理结构的角度为高寒草甸选择合适的施肥时间提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于兰州大学高寒草甸与湿地生态系统定位研究站进行。该研究站位于青藏高原东缘的甘肃省玛曲县,地理位置为 33°40' N, 101°51' E, 海拔 3570 m 左右,年平均气温 1.2 °C,年平均降水量 620 mm。月平均气温最低为 -11 °C(一月),最高为 11.7 °C(七月),主要生长季集中在 6~8 月。土壤类型为典型的高寒草甸土,植被类型是以嵩草属植物为优势类群的高草草甸,其优势物种为线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*),垂穗披碱草(*Elymus nutans*)。

### 1.2 试验设计与样品采集

施肥实验始于 2011 年 4 月,共设 4 个施肥处理,分别为不施肥(CK)、低氮施肥 N 5 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(N5)、中氮施肥 N 10 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(N10)、高氮施肥 N 15 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(N15)。所添加氮源为硝酸铵(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>),于每年 5 月初施加。每梯度施肥重复 6 次,共 24 个随机区组设计的实验小区(每小区面积为 10 m × 20 m),每个小区之间有 1 m 宽的缓冲带。2014 年分别于 6、7、8 月对每个小区按 S 形采集 5 个土样,混合后作为一个样品,在土壤样品自然风干后进行土壤水稳性团聚体组成分析及土壤理化性质的测定。

### 1.3 测定方法

土壤水稳性团聚体测定方法修改自 Wilson et al 等<sup>[13]</sup>称取 25 g 风干土(过 6 mm 土壤筛),加入蒸馏水以没过土壤 1~2 cm,以每分钟 30 次的频率震荡 10 分钟。将土壤和分散液全部置于孔径分别为 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.25 mm 和 0.038 mm 的套筛之上。保持套筛最顶端始终低于水面,震荡 30 min,收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒当中,烘干称重。为去除土壤中沙砾对土壤水稳性团聚体含量的影响,再将每一级团聚体加入适量 0.5% 六偏磷酸钠溶液,置于摇床上震荡 16 h,以破碎团聚体,再将各级团聚体过同一级筛子,用蒸馏水冲洗至全为砂粒,再将砂粒转移至铝盒内,烘干称重。两次重量相减即为每一级水稳性团聚体重量。

风干土样溶于 1 mol L<sup>-1</sup> KCl 溶液后用 pH 计(Sartorius Basic Meter PB-10, Sartorius AG, Germany)进行土壤酸碱度的测定。有机碳在 CHNS 元素分析仪

(Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany) 上以 450 °C 燃烧法进行测定。土壤速效氮使用流动注射分析仪(FIAstar 5000, FOSS, Denmark)进行测定。土壤球囊霉素含量按照 Wright 和 Upadhyaya 的方法进行测定<sup>[14]</sup>。

### 1.4 数据分析

所有试验数据均利用 R 语言进行统计分析<sup>[15]</sup>,基于线性混合效应模型(Linear mixed effects model)分析施肥及月份对土壤水稳性团聚体的影响,不同处理间的多重比较采用 HSD 检验(5%水平)。使用 R 语言“vegan”程序包中的“adonis”函数(PERMANOVA)检验施肥与月份对土壤水稳性团聚体分布的影响。采用逐步多元回归方法探讨土壤水稳性团聚体平均重量直径与各土壤理化性质间的关系,此方法在 R 语言中使用“step”函数。

水稳性团聚体平均重量直径(MWD)计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$

式中  $r_i$  是第  $i$  个筛子孔径(mm),  $m_i$  为第  $i$  个筛子的团聚体重量百分比。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质及水稳性团聚体总量

由表 1 可知,在不同采样月份间,土壤含水量、速效氮、有机碳、球囊霉素含量均具有显著差异( $P < 0.05$ ),但没有统一的变化规律,土壤 pH 值不受采样月份的影响。土壤速效氮含量、pH 值受氮肥添加影响显著( $P < 0.05$ ),但仅在中度和(或)高度氮施肥条件下,土壤速效氮含量和 pH 值才发生显著性变化。其它土壤理化因子,如有机碳含量等在各处理间无显著差异( $P > 0.05$ )。整体而言,各处理下土壤水稳性团聚体总量处于 80.78%~95.67%之间(图 1),其受采样月份( $F = 28.43$ ,  $P < 0.001$ )的影响大于氮肥添加( $F = 3.83$ ,  $P = 0.014$ )。6 月份各施肥处理下土壤水稳性团聚体平均含量最高(94.05%),其次为 8 月份(88.12%),7 月份土壤水稳性团聚体含量最低(84.25%)。在不同采样月份中, N10 处理下的土壤水稳性团聚体含量均最低;在 6、7 月份, N15 处理下土壤水稳性团聚体含量最高,而在 8 月份, N5 处理下土壤水稳性团聚体含量最高(图 1)。

### 2.2 土壤水稳性团聚体的组成

在各级水稳性团聚体中,粒径为 0.25~1 mm, 1~2 mm 和 2~4 mm 的水稳性团聚体在本研究样地中占

表 1 不同施肥及采样月份中土壤理化性质

Table1 Soil characteristics under different nitrogen addition treatments and sampling month

月份 Month	施肥处理 Fertilization	含水量 Moisture (%)	酸碱度 pH	速效氮 Available N (mg g <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic C (%)	球囊霉素 Glomalin-related protein (mg g <sup>-1</sup> )
六月	N0	24.58 ± 1.18 bc	5.30 ± 0.05 ac	85.99 ± 10.40 ab	1.75 ± 0.09 d	2.17 ± 0.08 ab
	N5	24.43 ± 0.49 bc	5.27 ± 0.02 ac	54.58 ± 9.27 bcd	1.72 ± 0.13 d	2.13 ± 0.10 ab
	N10	24.58 ± 0.53 bc	5.27 ± 0.02 ac	80.16 ± 15.32 ac	1.75 ± 0.08 d	2.16 ± 0.08 ab
	N15	24.05 ± 0.74 bc	5.15 ± 0.04 c	118.43 ± 24.91 a	1.75 ± 0.07 d	2.20 ± 0.12 a
七月	N0	20.68 ± 0.68 cd	5.25 ± 0.04 ac	31.26 ± 3.10 d	2.24 ± 0.12 abc	2.04 ± 0.04 ab
	N5	20.00 ± 0.53 d	5.40 ± 0.11 a	35.28 ± 3.80 cd	2.32 ± 0.16 ab	2.07 ± 0.08 ab
	N10	20.73 ± 0.46 cd	5.22 ± 0.02 ac	52.09 ± 6.09 bcd	2.34 ± 0.06 ab	2.03 ± 0.07 ab
	N15	21.21 ± 0.85 cd	5.18 ± 0.02 bc	57.84 ± 3.36 bcd	2.45 ± 0.12 a	2.03 ± 0.08 ab
八月	N0	27.49 ± 1.24 ab	5.29 ± 0.02 ac	21.96 ± 6.06 d	1.81 ± 0.04 cd	1.94 ± 0.07 b
	N5	29.48 ± 1.30 a	5.37 ± 0.04 ab	30.06 ± 2.05 d	2.03 ± 0.13 ad	1.95 ± 0.07 b
	N10	27.86 ± 0.58 ab	5.25 ± 0.03 ac	44.96 ± 2.59 bcd	1.94 ± 0.12 bd	2.03 ± 0.04 ab
	N15	27.80 ± 1.00 ab	5.19 ± 0.02 bc	47.61 ± 4.71 bcd	1.99 ± 0.07 bd	2.00 ± 0.10 ab
方差分析结果						
月份 M		78.98***	0.33	22.95***	38.35***	6.94**
施肥 F		0.11	7.63***	7.90***	0.89	0.12
月份 * 施肥 M*F		0.72	0.95	1.19	0.44	0.20

注: 表中理化数据为平均值 ± 标准误。各处理间(列)字母相同表示差异不显著  $\alpha = 0.05$ , 下表同。

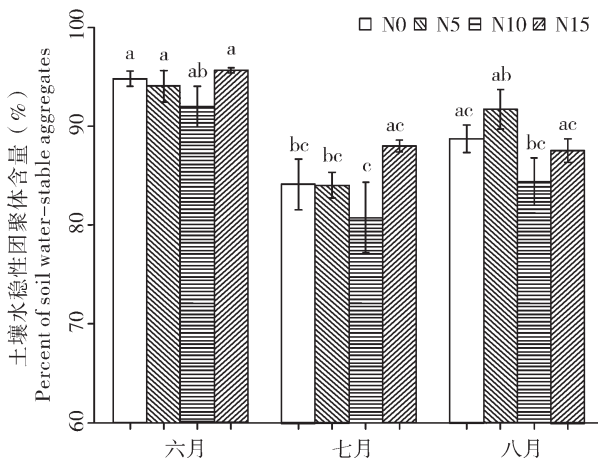


图 1 不同处理下土壤水稳性团聚体含量

Fig.1 Percentage of soil water-stable aggregates under different treatments

主导地位 其相对含量在各处理中均在 75%以上(表2)。其中 6 月份以 2 ~ 4 mm 粒径水稳性团聚体为主 (31.71%) ,7、8 月份则以 0.25 ~ 1 mm 粒径的水稳性团聚体为主(分别为 35.27%、30.71%)。土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD)在 1.41 mm ~ 2.08 mm 间, 属稳定和非常稳定的等级。基于混合线性模型分析表明各级土壤水稳性团聚体含量与 MWD 均受采样月份的显著影响 ( $P < 0.05$ ), 受施肥影响不显著 ( $P > 0.05$ )。MWD 和粒径为 4 ~ 6 mm、2 ~ 4 mm、1 ~ 2 mm 的水稳性团聚体含量随季节变化呈现先降后升的趋势, 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体含量变化不明显, 而 0.038 ~ 0.25 mm 粒径水稳性团聚体则呈现先升后降的趋势 (图 2)。Adonis 检验结果表明施肥对土壤水稳性团聚

表 2 不同施肥及采样月份的土壤水稳性团聚体组成

Table2 The composition of soil water-stable aggregates under different nitrogen addition treatments and sampling month

月份 Month	施肥处理 Fertilization	不同粒径团聚体所占比例 (%) Proportion of different size aggregates				
		4 ~ 6 mm	4 ~ 6 mm	4 ~ 6 mm	4 ~ 6 mm	4 ~ 6 mm
六月	N0	15.42 ± 2.24a	15.42 ± 2.24a	15.42 ± 2.24a	15.42 ± 2.24a	15.42 ± 2.24a
	N5	14.52 ± 0.99ab	14.52 ± 0.99ab	14.52 ± 0.99ab	14.52 ± 0.99ab	14.52 ± 0.99ab
	N10	10.62 ± 1.22ad	10.62 ± 1.22ad	10.62 ± 1.22ad	10.62 ± 1.22ad	10.62 ± 1.22ad
	N15	14.55 ± 0.73ac	14.55 ± 0.73ac	14.55 ± 0.73ac	14.55 ± 0.73ac	14.55 ± 0.73ac
七月	N0	5.20 ± 1.43d	5.20 ± 1.43d	5.20 ± 1.43d	5.20 ± 1.43d	5.20 ± 1.43d
	N5	6.53 ± 0.69d	6.53 ± 0.69d	6.53 ± 0.69d	6.53 ± 0.69d	6.53 ± 0.69d
	N10	6.71 ± 1.40d	6.71 ± 1.40d	6.71 ± 1.40d	6.71 ± 1.40d	6.71 ± 1.40d
	N15	6.61 ± 0.54d	6.61 ± 0.54d	6.61 ± 0.54d	6.61 ± 0.54d	6.61 ± 0.54d
八月	N0	9.07 ± 2.24bcd	9.07 ± 2.24bcd	9.07 ± 2.24bcd	9.07 ± 2.24bcd	9.07 ± 2.24bcd
	N5	9.85 ± 1.56ad	9.85 ± 1.56ad	9.85 ± 1.56ad	9.85 ± 1.56ad	9.85 ± 1.56ad
	N10	11.96 ± 2.40ad	11.96 ± 2.40ad	11.96 ± 2.40ad	11.96 ± 2.40ad	11.96 ± 2.40ad
	N15	8.38 ± 1.69cd	8.38 ± 1.69cd	8.38 ± 1.69cd	8.38 ± 1.69cd	8.38 ± 1.69cd
方差分析结果						
月份 M		23.36***	8.095**	8.203**	14.276***	32.346***
施肥 F		0.07	1.312	0.305	2.19	0.266
月份 * 施肥 M*F		1.517	1.474	0.802	3.278*	0.597

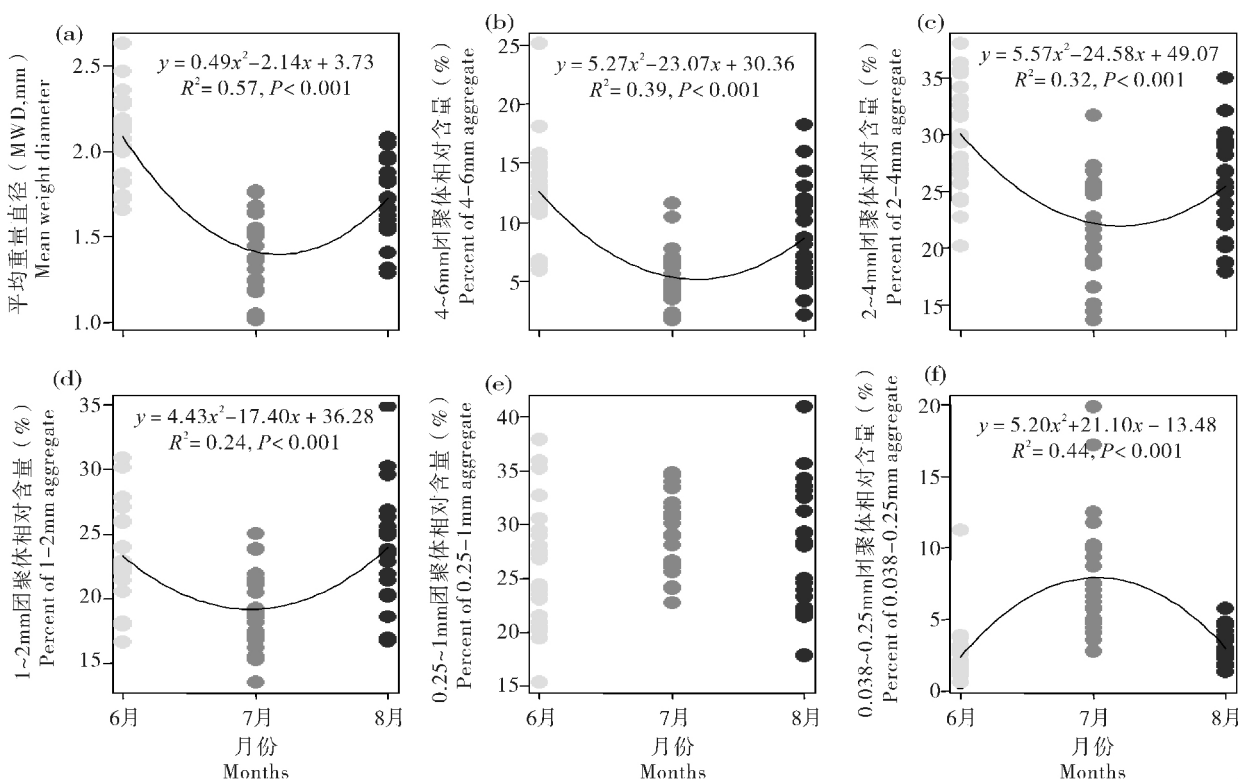


图 2 不同采样月份对土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD)及各粒径组成的影响  
Fig. 2 Effects of different sampling month on soil water mean weight diameter (MWD) and different size aggregates

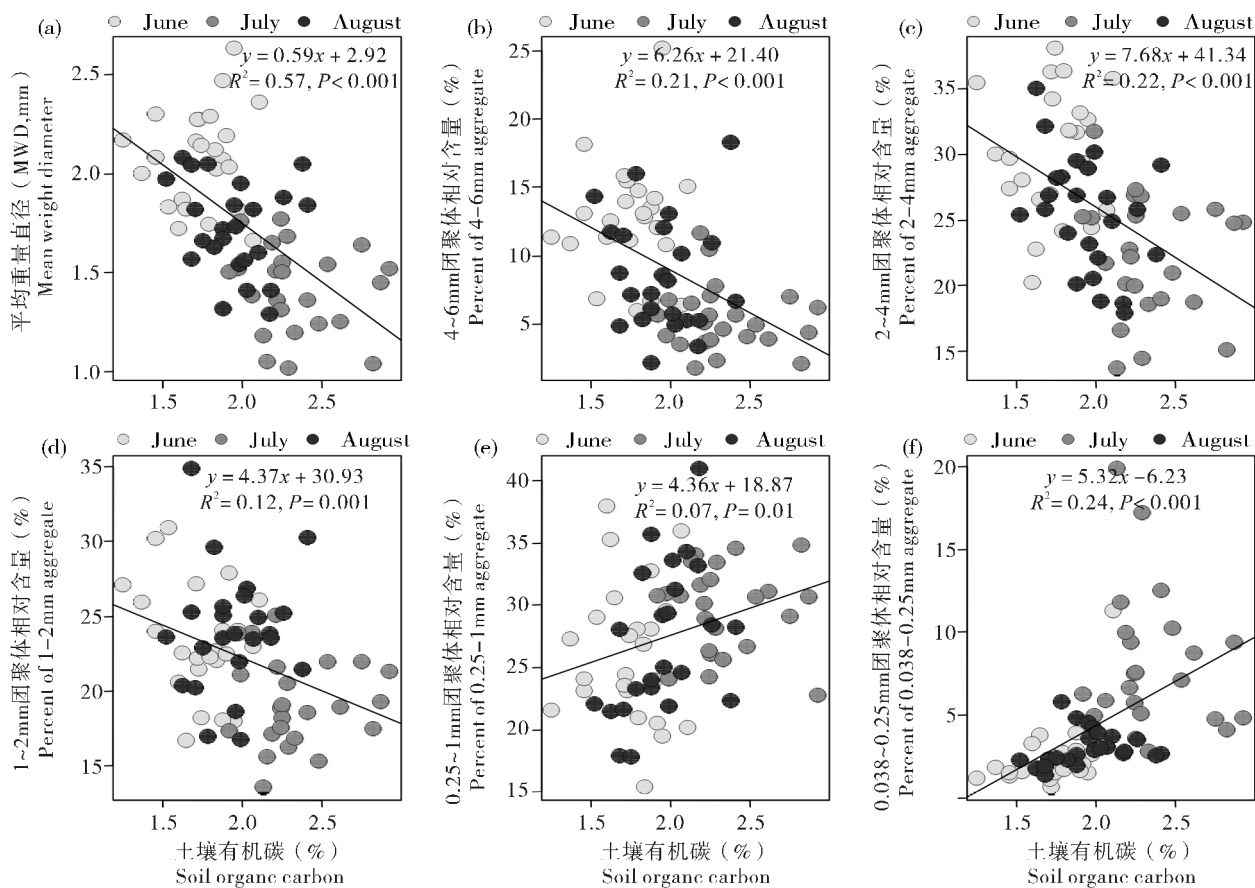


图 3 土壤有机碳含量与土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD)的相关关系  
Fig. 3 Relationship between soil organic carbon and mean weight diameter (MWD) of soil water stable aggregates

体的分布无显著影响 (Adonis  $R^2 = 0.034$   $P = 0.31$ ) ,但采样月份对其影响显著 (Adonis  $R^2 = 0.35$   $P = 0.001$ ) 。

逐步多元回归结果表明(图 3) ,在本实验所测定的土壤理化性质中,土壤有机碳含量及球囊霉素含量与 MWD 具有显著相关关系 ( $y = 1.78 - 0.61x_1 + 0.58x_2$  , $y$  为 MWD , $x_1$  为土壤有机碳含量 , $x_2$  为土壤球囊霉素含量 ; $R^2 = 0.41$  , $P < 0.001$ ) 。图 3 表明 MWD 和粒径为 4 ~ 6 mm、2 ~ 4 mm、1 ~ 2 mm 的水稳性团聚体含量均随土壤有机碳含量的上升而降低,粒径为 0.25 ~ 1 mm、0.038 ~ 0.25 mm 的水稳性团聚体含量随土壤有机碳含量的上升而上升。土壤球囊霉素含量仅与 MWD 和粒径为 4 ~ 6 mm 的水稳性团聚体含量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ) ,与其它粒径水稳性团聚体含量无显著相关关系。

### 3 讨论

青藏高原高寒草甸是典型受氮限制的生态系统,外源性氮输入会显著影响当地的多种生态进程。本研究中氮肥添加对各级土壤水稳性团聚体含量的影响均不显著,这与其它的研究结果是不一致的。陈晓芬等<sup>[16]</sup>指出氮肥处理可显著降低 0.053 ~ 0.25 mm 的水稳性团聚体含量,但对 < 0.053 mm 水稳性团聚体含量和大团聚体含量(> 0.25 mm)无显著影响;曾希柏等<sup>[17]</sup>却发现氮肥添加在降低了 > 2 mm 水稳性团聚体含量的同时,提高了 < 0.053 mm 粒径的水稳性团聚体含量,但对其它组分的水稳性团聚体含量无显著影响。这种不一致的结果在很大程度上是由不同研究中所选样地的土壤质地、基础营养等因素的差异造成的。本研究中土壤水稳性团聚体总量在各个采样月份间均随施肥梯度的增加呈先降后增的趋势,这与刘晓东等<sup>[10]</sup>的研究结果是相反的,他们发现 0 ~ 20 cm 处土壤水稳性团聚体总量在 8 月份随土壤肥力的增加呈现先增后降的趋势。研究表明,青藏高原地区不同植被下的土壤水稳性团聚体含量差异显著<sup>[18]</sup>,刘晓东等<sup>[10]</sup>的研究样地植被类型以禾草类和杂草类群为主,而本研究样地则是以嵩草属植物为主的高草草甸,不同的植被类型或许解释了土壤水稳性团聚体对氮素添加响应的差异。此外,土壤有机碳含量是影响土壤水稳性团聚体含量的重要因素,而有机肥的施用可通过增加土壤有机碳含量进而增加土壤水稳性团聚体含量<sup>[19]</sup>;因此,在青藏高原草地生产力的恢复中应同时考虑有机肥或不同肥料配施的方法<sup>[20,21]</sup>。

粒径高于 1 mm 的土壤水稳性团聚体含量在不同采样月份间均呈现先降后升的趋势,而 0.038 ~ 0.25 mm

粒径的水稳性团聚体含量却呈先升后降的趋势。这说明土壤大团聚体与微团聚体间处于不断相互转化的动态过程中,在 7 月份土壤大粒径团聚体(> 0.25 mm)发生裂解向微团聚体(< 0.25 mm)转变。有多个原因可解释 7 月份间土壤大粒径团聚体的裂解:第一,植物根系的生长可增加土壤有机碳含量、提供团聚体形成所需要的物理挤压力,有利于土壤水稳性团聚体的形成与稳定<sup>[22-24]</sup>。但本研究样地的植物主要以多年生草本植物为主,其地下根系发达且错综复杂地缠绕在一起,因而在植被生长旺盛的 7 月,根系生长所造成的挤压力可能反而会导致大粒径水稳性团聚体的裂解。第二,在温度最高的 7 月份,土壤微生物生物量及其活性均较高,这可能会通过影响土壤有机质的分解降低土壤胶结物质的含量,直接或间接地影响土壤水稳性团聚体的组成<sup>[25]</sup>。第三,蚯蚓作为当地主要吞食土壤的动物,在 7 月份数量和活性最高,它们可通过肠腔活动破坏大团聚体的结构,转化和形成新的微团聚体<sup>[26]</sup>。最后,7 月份降雨的增加同样也会通过影响土壤含水量的变化从而引起了土壤大团聚体的破碎,增加其向中微粒径团聚体的转变<sup>[27]</sup>。

本研究中土壤大粒径团聚体含量和水稳性团聚体平均重量直径(MWD)与土壤有机碳含量呈现显著负相关关系。土壤有机质是团聚体形成的主要胶结物质,一般认为土壤团聚体含量随土壤有机质的增加而增加<sup>[28]</sup>,但也有研究报道指出土壤有机质与 MWD 间不存在显著相关关系<sup>[29]</sup>。相较于总有机碳含量(TOC),土壤有机碳的不同组分如颗粒态有机碳(POC)、轻组分有机碳(LFOC)、水溶性有机碳(WSOC)等<sup>[30]</sup>对土壤团聚体稳定性的贡献率更大。因此,有机碳组分的差异可能影响了其与团聚体含量的相关关系<sup>[31]</sup>。大粒径水稳性团聚体含量与 MWD 和球囊霉素含量的正相关关系在多篇研究中被报道<sup>[32,33]</sup>;在本研究中,土壤球囊霉素含量与 MWD 和 4 ~ 6 mm 水稳性团聚体含量同样呈显著正相关关系。球囊霉素是由丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi)产生的一类含金属离子的糖蛋白,在稳定土壤结构方面起着非常重要的作用<sup>[34,35]</sup>。此外,丛枝菌根真菌的根外菌丝也会通过物理作用将土壤微团聚体缠绕成大团聚体<sup>[36]</sup>。这表明丛枝菌根真菌在稳定土壤结构方面是一类非常重要的真菌,今后的研究中应充分考虑丛枝菌根真菌在稳定土壤结构中的作用。

### 4 结论

中度施肥降低了青藏高原东缘土壤水稳性团聚体含量,且水稳性团聚体含量随施肥浓度的增加呈先降

后升的非线性变化趋势。较于施肥, 采样月份对土壤水稳性团聚体总量及其粒径分布组成有着更为显著的影响, 但不同粒径的水稳性团聚体对采样月份的响应存在差异。土壤有机碳与球囊霉素含量是影响土壤水稳性团聚体组成的重要土壤因子。该实验结果显示了土壤肥力在调控土壤物理结构组成中的作用, 也表明了采用施肥策略快速恢复草地生产力时应充分考虑施肥时间是否合理。

#### 参考文献:

- [1] 李绍良, 陈有君, 关世英, 等. 土壤退化与草地退化关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1): 92 - 95.
- [2] 蔡晓布, 张永青, 邵伟. 藏北高寒草原草地退化及其驱动力分析[J]. 土壤, 2007, 39(6): 855 - 858.
- [3] 李本银, 汪金舫, 赵世杰, 等. 施肥对退化草地土壤肥力、牧草群落结构及生物量的影响[J]. 中国草地学报, 2004, 26(1): 14 - 17.
- [4] 宗宁, 石培礼, 蒋婧, 等. 施肥和围栏封育对退化高寒草甸植被恢复的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(6): 905 - 913.
- [5] DEXTER A R. Advances in characterization of soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11(3 - 4): 199 - 238.
- [6] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1042 - 1049.
- [7] LAI R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century[J]. Soil Science, 2000, 165(3): 191 - 207.
- [8] BARTHES B, ROOSE E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47(2): 133 - 149.
- [9] BRONICK C J, LAI R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1 - 2): 3 - 22.
- [10] 刘晓东, 尹国丽, 武均, 等. 青藏高原东部高寒草甸草地土壤物理性状对氮元素添加的响应[J]. 草业学报, 2015, 24(10): 12 - 21.
- [11] 陈伟, 张威, 李师翁, 等. 青藏高原不同类型草地生态系统下土壤可培养细菌数量及多样性分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1419 - 1426.
- [12] SISTLA S A, SCHIMMEL J P. Seasonal patterns of microbial extracellular enzyme activities in an arctic tundra soil: identifying direct and indirect effects of long-term summer warming [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 66: 119 - 129.
- [13] WILSON, G W T, RICE, C W, RILLIG, M C, et al. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments[J]. Ecology Letters, 2009, 12: 452 - 461.
- [14] WRIGHT S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Soil Science, 1996, 161(9): 575 - 586.
- [15] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2013, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [accessed on 20 April 2016].
- [16] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 950 - 960.
- [17] 曾希柏, 柴彦君, 俄胜哲, 等. 长期施肥对灌漠土团聚体及其稳定性的影响[J]. 土壤通报, 2014(4): 783 - 788.
- [18] 王建林, 王忠红, 张宪洲, 等. 不同植被对高寒草原生态系统土壤有机碳组成和水稳性团聚体含量的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(6): 749 - 757.
- [19] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155 - 176.
- [20] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 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.
- [21] 冷延慧, 汪景宽, 李双昇. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2171 - 2177.
- [22] RILLIG M C, AGUILAR TRIGUEROS C A, BERGMANN J, et al. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation[J]. New Phytologist, 2015, 205(4): 1385 - 1388.
- [23] KIHARA J, MARTIUS C, BATIONO A, et al. Soil aggregation and total diversity of bacteria and fungi in various tillage systems of sub-humid and semi-arid Kenya [J]. Applied Soil Ecology, 2012, 58: 12 - 20.
- [24] FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1): 1 - 8.
- [25] OZTAS T, GARCIA-FRANCO N, MARTÍNEZ-MENA M, GOBERNA M, et al. Changes in soil aggregation and microbial community structure control carbon sequestration after afforestation of semiarid shrublands [J]. Soil Biology and Biochemistry, 20015, 87: 110 - 121.
- [26] MARINISSEN J C Y, NIJHUIS E, VAN BREEMEN N. Dispersion of clay in wet earthworm casts of different soils[J]. Applied Soil Ecology, 1996, 4: 83 - 92.
- [27] SARAH P. Soil aggregation response to long- and short-term differences in rainfall amount under arid and Mediterranean climate conditions[J]. Geomorphology, 2005, 70(1 - 2): 1 - 11.
- [28] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141 - 163.
- [29] WANG S, WU Q S. Distribution of glomalin-related soil protein and soil organic carbon in water-stable aggregate fractions of citrus rhizosphere[J]. BioTechnology: An Indian Journal, 2015, 11(1): 14 - 17.
- [30] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 等. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4148 - 4155.
- [31] ZHANG S, WANG R, YANG X, et al. Soil aggregation and aggregating agents as affected by long term contrasting management of an Anthrosol [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 39107.
- [32] WU Q S, CAO M Q, ZOU Y N, et al. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae, and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliate orange[J]. Scientific Reports, 2014, 4:5823.
- [33] BEDINI S, PELLEGRINO E, AVIO L, et al. Changes in soil

- aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (7): 1491 - 1496.
- [34] LI X L, ZHANG J L, GAI J P, et al. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi of sedges to soil aggregation along an altitudinal alpine grassland gradient on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Microbiology*, 2015, 17(8): 2841 - 2857.
- [35] 田 慧, 刘晓蕾, 盖京苹, 等. 球囊霉素及其作用研究进展[J]. *土壤通报*, 2009, 5: 1215 - 1220.
- [36] 冯 固, 张玉凤, 李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 99 - 102.

## Seasonal Dynamic of Soil Water-stable Aggregates under Nitrogen Fertilization Treatments in an Alpine Meadow Ecosystem

JIANG Sheng-jing<sup>1</sup>, LUO Jia-jia<sup>2,3</sup>, JIN Zhong-cai<sup>1</sup>, SHI Guo-xi<sup>4</sup>, CHAI Yu-xing<sup>1</sup>,  
LIU Yong-jun<sup>1</sup>, FENG Hu-yuan<sup>1\*</sup>

(1. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement in Southern China, Ministry of Agriculture, Danzhou 571737, China; 4. The Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Region of Qinghai Province, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

**Abstract:** The changes of soil water-stable aggregate in different months under different nitrogen fertilization treatments were studied in an alpine meadow of eastern Qinghai-Tibetan Plateau. The results showed that the proportions of soil water-stable aggregates were between 80.78% and 95.67%, and the mean weight diameters (MWD) ranged from 1.41 mm to 2.08 mm. Nitrogen addition had no significant effects on MWD and the proportion of water-stable aggregates. The sampling season had more significant effects on soil water-stable aggregates distribution. The 2 - 4 mm aggregate was dominant in June, while the 0.25 - 1 mm aggregate was dominant in July and August. The proportion of water-stable aggregates, MWD and the > 1mm aggregate all decreased first and then increased in the sampling months, while the 0.038 - 0.25 mm aggregate showed the opposite trend. Soil organic C and glomalin-related protein were the key soil factors affecting the formation and stability of soil water-stable aggregates. These results indicated that the addition of moderate nitrogen fertilizer can reduce the proportion of soil water-stable aggregates. The continuous process of cracking and formation of soil aggregate in different sampling months and the differences in soil physical structure between seasons should be taken into account when applied fertilizers to the Tibetan Plateau.

**Key words:** Fertilization; Seasonal variation; Tibetan Plateau; Soil aggregate

[责任编辑 张玉玲]