

短期放牧对高寒草甸土壤水稳性 团聚体构成及稳定性的影响

薛冉, 郭雅婧, 苗福泓, 李世卿, 郭正刚, 沈禹颖

(兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 土壤水稳性团聚体是土壤肥力的基础。以青藏高原东北边缘地区高寒草甸为对象, 采用放牧控制试验研究不同放牧强度下各粒级水稳性团聚体含量、根系和微生物数量的变化特征, 以期阐明短期放牧对水稳性团聚体及其稳定性的影响。结果表明, 中牧能够增加土壤内水稳性大团聚体的含量。土壤水稳性团聚体有机碳含量随土层深度增加而减少, 中牧时在 0—10 cm 土层, 粒径 >1 mm 的土壤水稳性团聚体有机碳含量显著低于对照, 但在 10—20 cm 土层, 粒径 <1 mm 土壤水稳性团聚体有机碳含量大于对照和其他放牧处理; 随着放牧梯度的增大, 地下生物量也递增, 在 0—10 cm 土层表现最为明显; 中牧处理下土壤中真菌数量最大, 而放线菌的数量随着放牧强度的增大而增大。

关键词: 高寒草甸; 水稳性团聚体; 放牧强度; 根系; 微生物

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0082-05

中图分类号: S812.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.016

Effects of Short-term Grazing on Constitution and Stability of Soil Water-stable Aggregates in Alpine Meadow

XUE Ran, GUO Ya-jing, MIAO Fu-hong, LI Shi-qing, GUO Zheng-gang, SHEN Yu-ying

(College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: Soil water-stable aggregates are the base of soil fertility. The content of water-stable aggregates was measured under controlled conditions to determine how short-term grazing influences soil aggregate stability and biomass in an alpine meadow on the northeastern edge of the Qinghai—Tibetan Plateau. Results showed that the content of water-stable macro-aggregates increased under moderate grazing. Organic carbon in water-stable aggregates was reduced with increasing soil depth. Compared with the control, organic carbon in >1 mm water-stable aggregates within 10 cm of soil surface was significantly reduced under moderate grazing, but <1 mm water-stable aggregates in the 10—20 cm soil layer increased. The biomass was significantly increased within 10 cm of soil surface with the increasing grazing intensity. Rhizosphere soil under moderate grazing had the largest amount of fungi and the number of actinomycetes increased with the increasing grazing intensity.

Keywords: alpine meadow; water-stable aggregate; grazing intensity; root system; microorganism

青藏高原草地植物较短的生长周期决定了夏季牧场放牧时间只有 3—4 个月^[1], 因此其决定着草地群落和初级生产力, 并且影响土壤理化性质。水稳性团聚体是土壤肥力的基础性指标和重要组成部分, 其空间排列特点不仅影响着土壤通气性、透水性、持水量、土壤容重、孔隙度、入渗性和抗蚀性等基本性状, 还影响着土壤微生物总量和分布、酶的种类及活性, 进而影响着土壤给予植物养分的能力, 因此土壤水稳

性团聚体组分及其稳定性是决定草地生态系统土壤供给能力的物理性状之一。目前水稳性团聚体稳定性的研究方法主要有 2 种途径, 一种是分形维数, 众多研究表明分形维数越小表示土壤团聚体稳定性越好^[2-3], 另外一种途径是测定土壤团聚体有机碳含量, 有机碳含量越高土壤团聚体稳定性越高^[4]。土壤有机质是影响土壤水稳性团粒含量的主导因子之一^[5-7], 这是因为土壤团聚体是有机质阳离子和黏粒

收稿日期: 2013-07-05

修回日期: 2013-07-18

资助项目: 国家农业行业公益科技项目“青藏高原草地承载力与家畜配置”(200903060), “青藏高原社区草—畜高效转化关键技术专项”(201203006)

作者简介: 薛冉(1990—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为草业科学。E-mail: xuer08@lzu.edu.cn.

通信作者: 沈禹颖(1965—), 女(汉族), 上海市人, 博士, 教授, 主要从事草地农业系统研究。E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn.

共同作用形成的^[8],大粒径团聚体含量越高,土壤性质越稳定,抗侵蚀能力也越强。

虽然土壤团聚体详细的形成机理尚不清晰,但目前已经证实大粒径土壤团聚体是小粒径土壤团聚体在植物根系和菌丝共同缠绕作用下形成的^[9-11],特别是植物细根能够提高大粒径团聚体的含量和土壤团聚体的总量,这不仅与根系的穿插、挤压和缠绕等机械作用有关,而且与根系分泌物能够加速黏结土壤颗粒有关,因此根系总量和分泌物增加均可通过提高团聚体总量而提升土壤稳定性^[12-14]。土壤微生物的菌丝和其分泌物能够缠绕和黏结土壤颗粒,促进团聚体的形成,Martin 等^[15]的研究表明土壤真菌形成的团聚体中,50%是菌丝直接缠绕作用形成的,因此土壤微生物含量是衡量水稳性团聚体的重要指标之一。

本研究通过分析不同放牧梯度下草地土壤水稳性团聚体含量和有机碳、根系生物量,以及微生物数量,揭示了放牧对青藏高原东北边缘高寒草地土壤水稳性团聚体的影响,以期全面阐明放牧对青藏高原草地的作用机制。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究地点位于甘肃省武威市天祝县抓喜秀龙乡南泥沟村,地理坐标为:102°29′—102°33′E,37°11′—37°12′N,地处青藏高原东北缘,海拔在 2 878~3 425 m,昼夜温差大,气候变化无常,属高寒湿润气候,无霜期 76 d,年均气温 -2 °C,年降水量 400 mm,主要集中在 7—9 月。土壤为冲积母质上发育的高山草甸土,以栗钙土为主。草地植被类型以亚高山嵩草草甸类为主,主要物种有嵩草(*Kobresia capillifolia*)、苔草(*Carex tristachya*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、早熟禾(*Poa annua*)等,并伴有阴山扁蓄豆(*Melissitus ruthenica*)、凤毛菊(*Saussurea superba*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)及黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、秦艽(*Gentiana macrophylla*)和狼毒(*Stellera chamaejasme*)等有毒植物。

1.2 试验设计

放牧自 2010 年 6 月开始至 10 月 1 日结束,2011 年 5 月 15 日开始至 9 月 30 日结束,根据当地的草产量以及当地牧民的放牧习惯,设定 3 个放牧梯度:轻牧(LG,0.75 个牦牛单位/hm²)、中牧(MG,1 个牦牛单位/hm²)和重牧(HG,1.25 个牦牛单位/hm²),每个放牧小区面积 4 hm²,3 个重复,共 9 个放牧小区,样地内设置 6 个 1 m×1 m 笼扣,作为未放牧处理(CK)。

1.3 取样与样品分析

1.3.1 土壤水稳性团聚体测定 2011 年 9 月 30 日在每个放牧小区内,随机选取 3 个样点,按 0—10,10—20,20—30 cm 的层次取原状土样。在实验室风干后,手工捡出土样中的草根等,用橡皮榔头轻轻敲打块状土样,采用干筛法筛取粒径在 5~2 mm 的土壤 40 g,每个土样设置 3 个重复,用湿筛法(沙维诺夫法)^[16]分别收集 5~2,2~1,1~0.5 和 0.5~0.25 mm 的各级水稳性团聚体颗粒,80 °C 烘干后称重,计算各级水稳性团聚体的比重。

土壤水稳性团聚体有机碳含量的测定:分别将粒径 >1 和 <1 mm 的土壤团聚体碾碎,并混合均匀,采用重铬酸钾氧化还原滴定法测定其有机碳含量,每个土样重复 3 次。

1.3.2 植物根系测定 同样用 40 mm 土钻按 0—10,10—20,20—30 cm 的层次取原状土样。用洗根法收集植物根系,采用孔径 0.5 mm 以上的土筛分别获取 3 个土层的根系,洗净后置于 65 °C 烘箱内烘干至恒重。

1.3.3 土壤微生物的培养计数 在每一样地内采用蛇形取样法选取 3 个点,在 0—20 cm 土层取根际土壤,混合后将样品带回实验室。首先用冷冻干燥法测定土样中水分,用平板稀释培养法进行土壤真菌和放线菌计数测定,真菌培养采用马丁氏培养基,放线菌培养采用改良的高氏 I 号培养基。

1.4 数据分析

通过 SPSS 17.0 软件进行统计分析,采用单因子方差分析(ANOVA)对 3 个放牧梯度下土壤团聚体含量、地下生物量和微生物数量做显著性分析和方差齐次性检验,Duncan 法做多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度对土壤水稳性团聚体含量及分布的影响

放牧 2 a 后,在 0—10 cm 土层,中牧下水稳性大团聚体(粒径 5~0.25 mm)的含量高于对照、轻牧和重牧处理,特别是 0.5~0.25 mm 水稳性团聚体含量比轻牧和重牧条件显著提高 35.8%和 43.1%,微团聚体(粒径 <0.25 mm)含量则显著低于对照和其他 2 个放牧处理($p < 0.05$)(图 1a);在 10—20 cm 土层,中牧下粒径 5~2 mm 的土壤团聚体含量低于对照组和其他放牧处理,但未达到显著水平,而粒径 1~0.5 mm 土壤团聚体比例比对照、轻牧和重牧处理分别高出 147%,221%和 142%。轻牧和重牧处理下,

各粒径土壤团聚体的含量与对照相比无明显差异(图 1b);20—30 cm 土层中,各放牧处理下不同粒径土壤团聚体含量与对照相比无显著差异(图 1c)。结果表

明,中牧有助于表层土壤中水稳性大团聚体的形成,也进而说明了短期的中牧条件有利于高寒草甸土壤结构稳定性的提高。

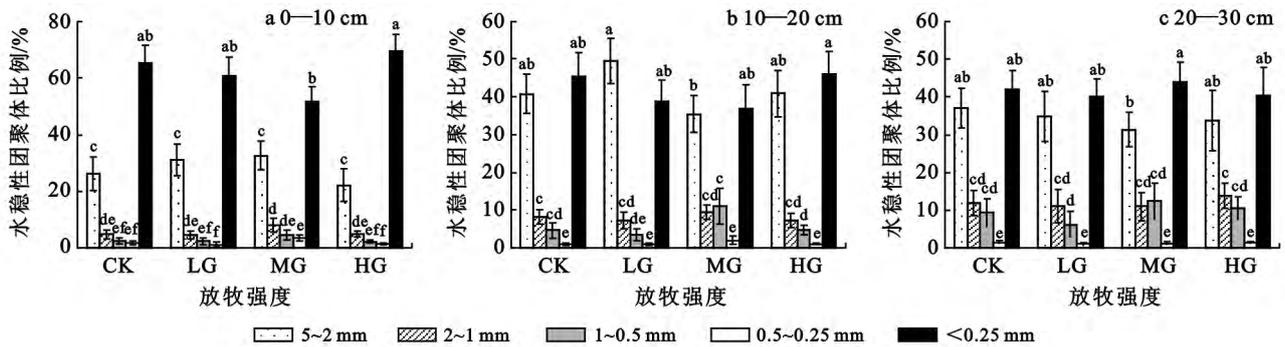


图 1 短期放牧对高寒草甸 0—30 cm 土层不同粒径土壤水稳性团聚体含量的影响

注:同一土层不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

综合分析 3 个土层,可以发现与 0—10 cm 土层相比,10—20 cm 土层水稳性大团聚体的含量升高,微团聚体的含量降低;与 10—20 cm 土层相比,20—30 cm 土层中粒径 5~2 mm 水稳性团聚体含量降低,粒径 2~0.5 mm 水稳性团聚体含量有升高的趋势。说明短期放牧会影响水稳性团聚体在不同深度土层的含量。

2.2 不同放牧强度对水稳性团聚体有机碳含量的影响

短期放牧后,在不同放牧梯度下,各个土层不同粒

径的团聚体有机碳含量的差异不明显:各土层中呈现粒径 > 1 mm 土壤团聚体有机碳含量高于粒径 < 1 mm 团聚体的规律。中牧处理下粒径 > 1 mm 的土壤团聚体有机碳含量在 0—10 cm 土层显著低于对照、轻牧和重牧处理($p < 0.05$)(图 2a);中牧下,粒径 < 1 mm 团聚体有机质含量在 10—20 cm 土层大于对照及其他放牧处理(图 2b),而在其他粒径和土层下均小于对照及其他放牧处理。结果表明,不同的放牧强度会影响高寒草甸不同土层中水稳性团聚体有机碳含量。

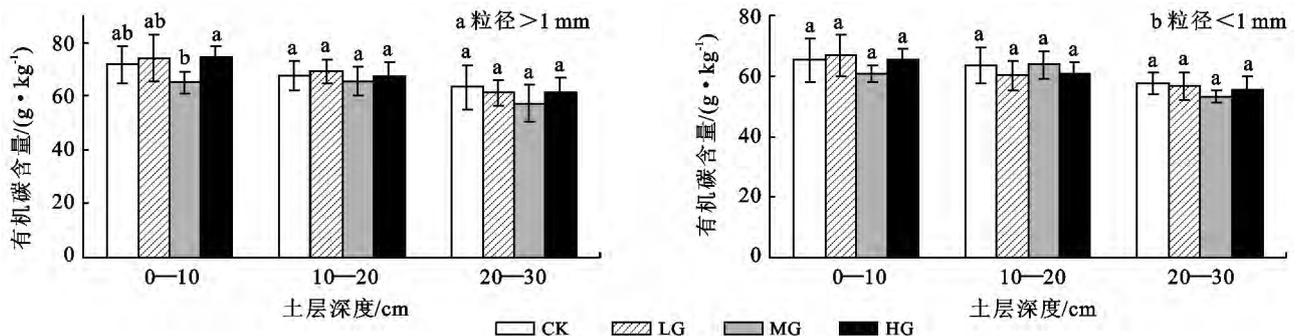


图 2 短期放牧对高寒草甸不同粒径土壤水稳性团聚体有机碳含量的影响

2.3 不同放牧强度对植物根系生物量及分布的影响

短期放牧后,高寒草甸根系主要集中在 0—10 cm 土层,占地下生物总量的 77.6%~87%,且随着放牧梯度的增大而增加。重牧下根系生物量较轻牧和中牧分别高 86.0%和 20.4%,中牧下地下生物量与对照处理相近。在 10—20 和 20—30 cm 土层,各放牧梯度下的根系生物量之间差异不大,且与对照处理无显著性差异($p > 0.05$,表 1)。表明不同的放牧强度会对植物根系的空间分布产生很大影响,这是由于放牧强度的增加会导致高寒草甸地上生物量的降低,植物会应激的增加地下生物量来保证营养物质的充足。

表 1 短期放牧对高寒草甸根系空间分布的影响 g/m^2

放牧处理	土层深度/cm		
	0—10	10—20	20—30
CK	3 584.84±595.09ab	635.85±313.22a	225.23±121.75a
LG	2 596.33±570.16b	509.25±171.04a	241.11±114.95a
MG	4 011.50±561.64ab	490.86±208.44a	176.18±68.87a
HG	4 830.34±826.35a	546.92±225.40a	171.08±80.70a

注:同列同一土层不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.4 不同放牧强度对土壤微生物总数的影响

经过 2 a 的短期放牧,青藏高原高寒草甸土壤微生物中的真菌和放线菌数量上呈现不同的变化,其

中,重牧处理下土壤真菌数明显小于轻牧和中牧(图 3a),而 3 个不同放牧梯度下,放线菌的数量呈现随放牧强度的增大而增加的趋势,但与对照相比,均不

存在显著性差异(图 3b)。表明短期放牧会影响高寒草甸土壤中微生物的数量,其中,对真菌的影响较显著。

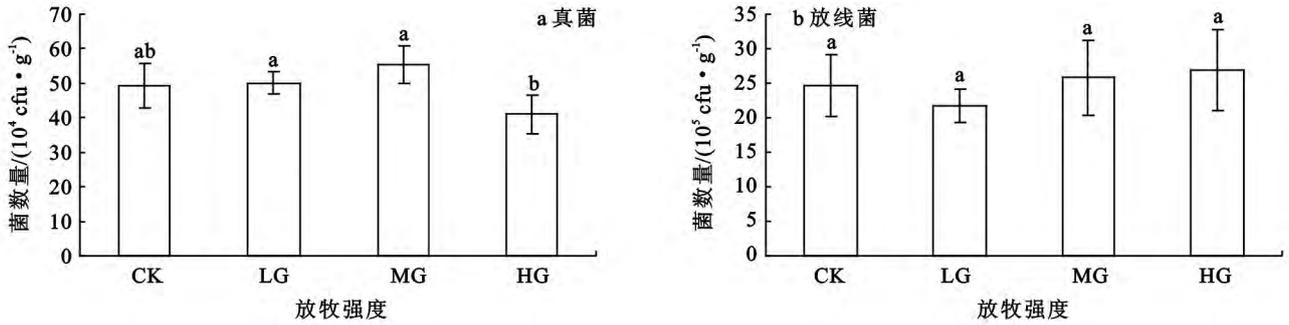


图 3 短期放牧对高寒草甸土壤微生物数量的影响

3 讨论

3.1 根系对土壤水稳性团聚体含量的影响

土壤水稳性团聚体的含量是表征土壤稳定性的重要指标。李勇等^[12]在黄土高原通过对植物根系以及土壤抗冲性的研究提出了有效根密度的概念,即土壤剖面 100 m² 截面对土壤抗冲性有增强效应的 ≤1 mm 径级须根的数目。在四川盆地和长江中下游林地的相关研究证明 ≤1 mm 细根通过活细胞分泌物和死细胞提供有机质作为黏合剂,能够显著提高团聚体和大粒径团聚体的总量^[17-18]。可见根系是土壤水稳性团聚体形成和保持稳定的重要条件,有效根密度也能作为判定根系影响水稳性团聚体形成的重要指标之一。青藏高原高寒草甸群落主要以须根系植物为主,不同种类植物根系错综复杂的缠绕在一起,尤其是在 0—10 cm 土层,不同形态的根系将土壤“包裹”起来,极难分离,维持了土壤稳定性,但这也影响了该地区有效根密度相关研究的进行。

本研究结果表明中牧能够提高 0—10 cm 土层土壤中水稳性大团聚体的含量,原因可能是植物根系主要集中于表层土壤,表层土壤是高寒草甸地下生物和非生物物质反应的主要场所,其理化特性能够反应短期放牧对土壤造成的即时影响,而中牧是高寒草甸的最适放牧强度,家畜的排泄物及对植物适当的采食有利于微生物和植物根系的生长发育,从而促进水稳性团聚体的形成。另一方面,虽然青藏高原高寒草甸根系生物量主要集中在 0—10 cm 土层,但是在此层的水稳性大团聚体的含量却小于 10—30 cm 土层,导致表层土壤中水稳性团聚体形成受阻的原因可能是由于在高海拔高寒的环境条件下,表层土壤的温度和湿度等条件不够稳定以及家畜对表层土壤的践踏作用。

而 10—20 cm 土层环境相对稳定,根系生物量又明显高于 20—30 cm 土层,所以水稳性大团聚体的含量最高。

3.2 根系对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

水稳性团聚体中有机碳含量越高,其抗蚀性越强,稳定性越好。有机碳能减小土壤颗粒间其他不稳定粘合力,并通过相互吸附作用使土壤颗粒黏结到一起,从而促进团聚体的生成^[15]。Puget 等^[19]认为稳定的土壤团聚体是由新有机碳胶结粒径较小的团聚体而形成的。彭新华等^[4]的研究也表明提高土壤中有机碳的含量能显著提高湿润破碎团聚体的稳定性,说明有机碳含量对水稳性团聚体稳定性有至关重要的影响,团聚体有机碳含量越高,团聚体越稳定。

本研究通过对土壤水稳性团聚体有机碳的测定来衡量其稳定性,得到在相同的放牧梯度下,随着土层深度的加深,水稳性团聚体中有机碳减少的结果,这是由于高寒草甸植物根系生物量也是随着土层的加深而减少的,说明根系对于青藏高原东北边缘高寒草甸土壤水稳性团聚体的稳定性有重要的影响。庞大的植物根系生长死亡更新产生的死根能够为水稳性团聚体的稳定性提供必要的活性有机碳,根系与其他土壤生物之间存在一系列的共生、互助关系也有利于土壤中有机碳的增加,为水稳性团聚体的稳定提供了必须的要素,这与前人^[18,20]在黄土高原地区和长江中下游林地实验得到的结论类似。但是本研究中发现,虽然中牧条件下水稳性大团聚体的含量大于对照及其他放牧处理,其有机碳含量却较少,这可能是由于中牧条件下,植物根系比较发达,有机碳的流动转化也较多所致,或者是中牧对水稳性团聚体有机碳的一个短期效应。

3.3 微生物对土壤水稳性团聚体含量的影响

微生物在团聚体形成过程中的作用与根系相似,

除了通过缠绕作用和分泌物的胶结作用,微生物的腐殖化作用也会促进团聚体的形成。冯固等^[21]的研究表明,接种丛植菌根真菌能够增加玉米根系分泌物,真菌菌根是形成粒径 5~2 mm 水稳性团聚体的必要条件。程丽娟等^[22]也发现接种大豆根瘤菌、园褐固氮菌、腔质芽孢杆菌、根霉和 5406 放线菌等均有助于土壤团聚体的形成,说明微生物对土壤水稳性团聚体的形成具有不可忽视的影响,尤其是菌丝的存在将直接影响到水稳性团聚体的含量。

本研究通过对真菌和放线菌的培养计数来表征土壤中菌丝的密度,发现土壤真菌总数和水稳性大团聚体都呈现出:中牧>轻牧>重牧的规律,因为家畜的排泄物以及对植物的采食会直接影响到微生物的生存环境,表层土壤中的微生物会对短期放牧产生即时响应,中牧条件给真菌的生长发育提供了的条件,其活性和数量达到了最大,对水稳性团聚体的形成起到了促进作用。说明在青藏高原高寒草甸,放牧强度影响真菌总数或菌丝密度,进而影响到水稳性团聚体的形成。

3.4 微生物对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

微生物菌丝所分泌的大分子多糖类物质可以增加土壤水稳性团聚体的稳定性。MacCalla^[23]在不同种类微生物提高土壤颗粒抗水冲击的研究中指出,真菌对提高土壤团聚体稳定性最为有效,其次是放线菌、细菌和酵母菌。Tisdall 等^[11]发现对于微生物菌丝来说,其分泌物黏结所形成的团聚体稳定性远高于菌丝缠绕所形成的团聚体。Jastrow^[24]的研究证明凋落物通过真菌菌丝和其他微生物分泌的大分子多糖的分解,能将土壤颗粒粘结在一起。但是,由于收集困难等原因,目前对菌丝及其分泌物对土壤团聚体稳定性影响的研究还存在一定困难^[21],需进一步的实验加以论证。

然而在本研究中,中牧条件下真菌的数量最大,但水稳性团聚体有机碳含量却最低,放线菌的数量与水稳性团聚体有机碳含量也没有显著的相关关系,这与前人的研究结果不同,有待于进一步的深入研究。

4 结论

青藏高原东北边缘高寒草甸经 2 a 短期放牧后,对土壤水稳性团聚体的研究分析发现:中牧条件下,各粒级水稳性团聚体的含量、分布和稳定性变化比较大;短期放牧主要影响表层土壤中根系生物量以及微生物的空间分布;根系和微生物群落对水稳性团聚体的含量及其稳定性有重要影响。

[参 考 文 献]

- [1] 李世卿,王先之,郭正刚,等.短期放牧对青藏高原东北边缘高寒草甸土壤及微生物碳氮含量的影响[J].中国草地学报,2013,35(1):55-60.
- [2] 储小院,王玉杰,刘绍娟,等.缙云山典型林地土壤团粒特征[J].林业建设,2011(2):23-29.
- [3] 付刚,刘增文,崔芳芳.黄土残塬沟壑区不同人工林土壤团粒分形维数与基本特性的关系[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(9):101-107.
- [4] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23(10):2176-2183.
- [5] 文倩,关欣.土壤团聚体形成的研究进展[J].干旱区研究,2004,21(4):434-438.
- [6] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰.不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征[J].中国水土保持科学,2006,4(4):47-51.
- [7] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1991,29(6):815-828.
- [8] Edwards A P, Bremner J M. Microaggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1967,18(1):64-73.
- [9] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对土壤水稳性团聚体形成的影响[J].土壤学报,1997,34(4):359-366.
- [10] 杨彭年.石灰性土壤有机质矿质复合体及其团聚性的研究[J].土壤学报,1984,21(2):144-152.
- [11] Tisdall J M, Oades J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth[J]. Australian Journal of Soil Research, 1980,18(4):423-433.
- [12] 李勇,朱显谟,田积莹.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J].科学通报,1991,36(12):935-938.
- [13] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37.
- [14] 宋日,刘利,马丽艳,等.作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J].南京农业大学学报,2009,32(3):93-97.
- [15] Martin J P, Martin W P, Page J B, et al. Soil aggregation[J]. Advances in Agronomy, 1955,7:1-37.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所物理研究室.土壤物理性质测定方法[M].北京:科学出版社,1978:83-88.
- [17] 董慧霞,李贤伟,张健,等.退耕地三倍体毛白杨林地细根生物量及其与土壤水稳性团聚体的关系[J].林业科学,2007,43(5):24-29.
- [18] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.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.
- [19] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 2000,51(4):595-605.

(下转第 91 页)

1.18 g/cm³。与0 a土壤的持水力(21 450.0 t/hm²)相比,经过不同年限的经营,持水力分别下降了10.6%~20.4%。

[参 考 文 献]

- [1] 理查德 L. 森林小气候[M]. 北京:气象出版社,1986:169-196.
- [2] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,等. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):134-138.
- [3] 杨吉华,张永涛,李红云,等. 不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(2):141-144.
- [4] 李文影. 不同林龄白桦林水源涵养及水化学特征研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2009.
- [5] 王鹏程,肖文发,张守攻,等. 三峡库区森林植被林地枯落物现存量及其持水能力[J]. 中国水土保持科学,2008,6(4):41-47.
- [6] 樊登星,余新晓,岳永杰,等. 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J]. 北京林业大学学报,2008,30(2):177-181.
- [7] 王云南. 浙江省典型经济林水土流失特征分析与防治措施优化设计[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [8] 黄兴召,黄坚钦,陈丁红. 不同垂直地带山核桃林地土壤理化性质比较[J]. 浙江林业科技,2010,30(6):27-31.
- [9] 路玉林,戴圣潜,李运怀,等. 安徽宁国市山核桃农业地质环境的因子分析研究[J]. 土壤通报,2006,37(6):1203-1206.
- [10] 黄程鹏,吴家森,许开平,等. 不同施肥山核桃林氮磷径流流失特征[J]. 水土保持学报,2012,26(1):43-52.
- [11] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, et al. Dose conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen: a review of the literature[J]. Global Change Biol., 2002,8(2):105-123.
- [12] 李良,翟洪波,姚凯,等. 不同林龄华北落叶松人工林枯落物储量及持水特性研究[J]. 中国水土保持,2010(3):32-34.
- [13] 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,2000.
- [14] 宫渊波,麻泽龙,陈林武,等. 嘉陵江上游低山暴雨区不同水土保持林结构模式水源涵养效益研究[J]. 水土保持学报,2004,18(3):28-32,36.
- [15] 杨吉华,张永涛,李红云,等. 不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(2):141-144.
- [16] 饶良懿,朱金兆,毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
- [17] 程金花,张洪江,余新晓,等. 贡嘎山冷杉纯林地地被物及土壤持水特性[J]. 北京林业大学学报,2002,24(3):45-49.
- [18] 高人,周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型枯落物层持水性能研究[J]. 沈阳农业大学学报,2002,33(2):115-118.
- [19] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [20] 蒋文伟,余树全,周国模,等. 安吉地区不同森林植被水源涵养功能的研究[J]. 江西农业大学学报:自然科学版,2002,24(5):635-639.

(上接第86页)

- [20] 李勇,武淑霞,夏侯国凤. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):1-7.
- [21] 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.
- [22] 程丽娟,来航线,李素俭,等. 微生物对土壤团聚体形成的影响[J]. 西北农业大学学报,1994,22(4):93-97.
- [23] MacCalla T M. Influence of some microbial groups on stabilizing soil structure against falling water drops[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1946,11(C):260-263.
- [24] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996,28(4):665-676.