

放牧对青藏高原东缘高寒草甸土壤微生物特征的影响

陈懂懂^{1,2}, 孙大帅¹, 张世虎¹, 谈嫣蓉¹, 杜国祯¹, 史小明¹

1. 兰州大学 干旱与草地农业生态教育部重点实验室, 兰州 730000

2. 中国科学院 西北高原生物研究所, 西宁 810001

摘要: 通过对青藏高原高寒草甸(甘肃省玛曲县)四个放牧梯度下土壤微生物特征的比较, 分析了该类草甸土壤微生物特征对不同放牧强度的响应. 结果显示: 与其他处理相比, 中牧处理下的土壤有较高的微生物量及微生物熵, 这表明在研究区域, 适度的放牧可以增加土壤有效性碳、氮库; 微生物代谢熵($q\text{CO}_2$)在禁牧、轻牧和中牧处理间无显著差异, 而重牧处理下的 $q\text{CO}_2$ 明显高于其他处理的, 说明高频度的放牧增强了土壤微生物的代谢活性; 不同放牧处理下的 $w(\text{C}_{\text{mic}})/w(\text{N}_{\text{mic}})$ 不存在显著差异, 说明放牧强度对微生物群落结构不存在显著影响, 在研究区域内细菌在微生物群落中占优势.

关键词: 放牧强度; 微生物量; 代谢熵; 青藏高原

中图分类号: S154.36

文献标识码: A

Effect of grazing intensity on soil microbial characteristics of an alpine meadow on the Tibetan plateau

CHEN Dong-dong^{1,2}, SUN Da-shuai¹, ZHANG Shi-hu¹, TAN Yan-rong¹,
DU Guo-zhen¹, SHI Xiao-ming¹

1. Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

Abstract: A comparative study on the soil microbial characteristics with different grazing intensities was conducted in an alpine meadow on the Tibetan Plateau (in Maqu county, Gansu province). The results showed that moderate grazing markedly stimulated the accumulation and immobilization of C and N in microbes compared with the other treatments, thus demonstrating that proper grazing promoted the enrichment of the available soil C and N pool in the study region. No significant difference was found between non-grazing, light grazing and moderate grazing for $q\text{CO}_2$, but the same variable in heavy-grazing was obviously higher than that under the other treatments, which suggested that the enhancement of grazing intensity increased the metabolic activity of the microbes. There was no obvious difference between the four treatments for $w(\text{C}_{\text{mic}})/w(\text{N}_{\text{mic}})$, which implied that grazing intensity had no marked effect on microbial community structure. Meanwhile, the bacteria was dominant in the microbial community in the study region.

Key words: grazing intensity; microbial biomass; $q\text{CO}_2$; Tibetan plateau

收稿日期: 2010-08-11; 修回日期: 2010-11-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40930533, 41030105)

作者简介: 陈懂懂(1982-), 女, 山东广饶人, 助理研究员, 博士, e-mail: chendong19821217@163.com, 研究方向为草地生态学和土壤生态学;

杜国祯(1955-), 男, 甘肃卓尼人, 教授, 博士研究生导师, e-mail: guozdu@lzu.edu.cn, 研究方向为高寒草甸种群及群落生态学、恢复生态学, 通信联系人.

放牧利用下,草地土壤性状的变化是一个相对缓慢的过程^[1],而土壤微生物量等特征对环境变化极敏感,能够较早地指示生态系统的功能变化,可作为土壤质量变化的早期预测指标^[2].因此通过监测不同放牧强度下土壤微生物特征的变化可以间接了解放牧强度对土壤性状的影响^[1].

玛曲高寒草甸位于河首曲流域,是黄河上游重要的生态屏障,在维护黄河流域水资源和生态安全方面具有不可替代的作用,而近年来不合理的放牧制度已导致该区草地的严重退化^[3].

目前对草地放牧的研究主要集中在草地群落数量特征^[3-5]、草地生产力与多样性^[6]及土壤理化性质^[7]等方面,对高寒草甸土壤微生物特征对放牧强度响应的研究较少^[2].因此我们以玛曲境内高寒草甸的土壤微生物特征为研究对象,比较不同放牧处理下微生物特性的变化,分析地上生物量、土壤养分质量分数与微生物量之间的关系,以便为该区确定合理的草地放牧及管理措施,实现草地畜牧业的可持续发展提供一定的理论依据.

1 研究区概况

本实验在兰州大学高寒草甸与湿地生态系统野外定位研究站——玛曲站进行(LUAMERS,北纬 $35^{\circ}58'$,东经 $101^{\circ}53'$).该站位于青藏高原东北缘,甘肃省玛曲县城以西,黄河以北约5 km处.该区平均海拔3570 m,属大陆性季风气候.年均温约 1.2°C (从1月份的 -10°C 到7月份的 11.7°C);年均降水量约620 mm,主要集中在生长季的6-8月.该区全年日照约2580 h,有霜期多于270天.土壤类型为高寒草甸土,地上植被为典型的高寒草甸植被,主要物种有莎草科的线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、高山嵩草(*K. pygmaea*)等,禾本科的羊茅(*Festuca ovina*)、波伐早熟禾(*Poa poophagorum*)等,菊科的凤毛菊属(*Saussurea* sp.)以及草玉梅(*Anemone rivularis*),生长季为4-10月^[8-9].

2 材料和方法

2.1 样地设置

在玛曲研究站附近,通过实地考察,同时参照文献^[10]对放牧强度和草地演替阶段的划分标准,选择4户牧民的放牧草场作为本研究的4个放牧处理,分别为禁牧、轻牧、中牧和重牧(表1).禁牧草地为1999年国家“天保工程”以来的围栏封育草地.放牧强度以单位面积草地上的载畜量来计,载畜量采用牦牛混合群平均值,1头成年牦牛相当于3个羊单位^[10].

表 1 实验地设置

Table 1 Design of the experiment

样地处理	家畜数/头	样地面 积/ hm^2	载畜量/ (头/ hm^2)	草地利 用率/%
禁牧(NG)	0	12.0	0	<5
轻牧(LG)	11(牛)和79(羊)	31.1	1.2	30
中牧(MG)	21(牛)和120(羊)	33.3	1.8	50
重牧(HG)	72(牛)和178(羊)	41.3	3.2	75

于2007年的5,7,9月(生长季的早、中、晚)在如上所述的每个处理内随机选取6个 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的样区.在每个样区内,采用“S”形多点(5点)取样,除去地表凋落物后,用内径5 cm的土钻采样(深度0~15 cm);然后将每个样区内所采土样组成一个混合样(每个处理取6个混合样),混匀后装于密封袋,立即将所有土样带回实验室.

每份混合土样测完水分含量后分为两部分:一部分过2 mm筛后用于微生物特征分析(4°C 保存).另一部分风干,其中的一部分子样品过2 mm筛,用于土壤pH值及(风干土)水分的测定;另一子样品过0.15 mm筛,用于测定 $w(\text{SOC})$ 和 $w(\text{TN})$.

2.2 土壤理化性质及微生物量的测定

$w(\text{SOC})$ 和 $w(\text{TN})$ 分别用硫酸—重铬酸钾氧化法和半微量凯氏定氮法测定.含水量(%),pH值和容重分别用烘干法、酸度计法($w(\text{土}):w(\text{氯化钾})=1.0:2.5$)和环刀法测定^[11].

氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物量,土壤 $w(\text{C}_{\text{mic}})$, $w(\text{N}_{\text{mic}})$ 矫正系数分别为0.38,0.45^[12].

微生物基础呼吸:每份新鲜土样称相当于25 g干土的量,重复3次,置于1 L的可密封广口瓶内,并调节其至土壤田间持水量的40%~60%,避光条件下($22\pm 1^{\circ}\text{C}$)(好气)培养.分别在培养的第1,2,4,10天用碱石灰法测定释放的 CO_2 ,取10天的均值作为最后计算的基础呼吸^[12].

土壤微生物活性采用微生物呼吸与 C_{mic} 的比值表示即 $q\text{CO}_2$,也称为代谢熵.

2.3 数据分析

所有实验数据的统计分析均在SPSS 15.0软件中进行.单因子方差分析(ANOVA)和最小显著差数法(LSD)用于不同放牧强度下各指标间的比较和差异显著性检验($\alpha=0.05$).用Pearson's相关分析法分析相关性.

3 结果

3.1 不同处理下的土壤理化特性

结果显示: $w(\text{SOC})$ 和 $w(\text{TN})$ 均与放牧强度成显著负相关(相关系数分别为0.591, -0.555,

$P < 0.01$); 土壤水分含量在不同处理间差异显著, 与放牧强度显著负相关(相关系数为0.900, $P < 0.01$); 禁牧、轻牧和中牧处理间的土壤pH值无显著差异, 但它们均与重牧处理下的该指标差异显著($P < 0.001$). 各处理间的土壤容重差异不显著(表2), 与放牧处理不存在显著相关性($P > 0.05$).

3.2 不同处理下的土壤微生物特性

由图1可知, $w(C_{mic})$, $w(N_{mic})$ 的最大值均出现于中牧处理: 对微生物量碳, 在整个生长季内, 除

重牧处理外, 其他处理下的最大值均出现于生长季初期; 对微生物量氮, 在整个生长季内, 除重牧处理外, 其他处理下的最小值均出现于生长季中期, 也即植被生长最旺盛的季节.

$w(C_{mic})/w(SOC)$ 和 $w(N_{mic})/w(TN)$ 与放牧强度无显著相关性($P > 0.05$), 最大值均出现于中牧处理(图2).

微生物代谢熵(qCO_2)与放牧强度存在显著正相关($P < 0.01$). 代谢熵在禁牧、轻牧和中牧处理

表2 不同放牧强度下的土壤理化特性

Table 2 Soil properties under different treatments

土壤理化特性	pH	含水量/%	容重/(g/cm ³)	$w(SOC)/10^{-6}$	$w(TN)/10^{-6}$	$w(C)/w(N)$
禁牧(NG)	6.1(0.20) ^b	37(0.8) ^a	0.91(0.03) ^b	47(0.9) ^a	4.3(0.1) ^a	11.0(0.03) ^a
轻牧(LG)	6.0(0.20) ^b	35(0.4) ^b	0.99(0.02) ^{ab}	45(1.0) ^a	4.1(0.1) ^{ab}	11.0(0.10) ^a
中牧(MG)	6.3(0.20) ^b	33(0.3) ^c	1.03(0.03) ^a	44(1.0) ^a	4.1(0.1) ^{ab}	11.0(0.10) ^a
重牧(HG)	7.3(0.01) ^a	30(0.4) ^d	0.94(0.03) ^{ab}	40(2.0) ^b	3.9(0.1) ^b	10.3(0.10) ^b

同行中不同字母表示差异达到显著水平($P < 0.05$), 括号内数字代表标准误($n=6$).

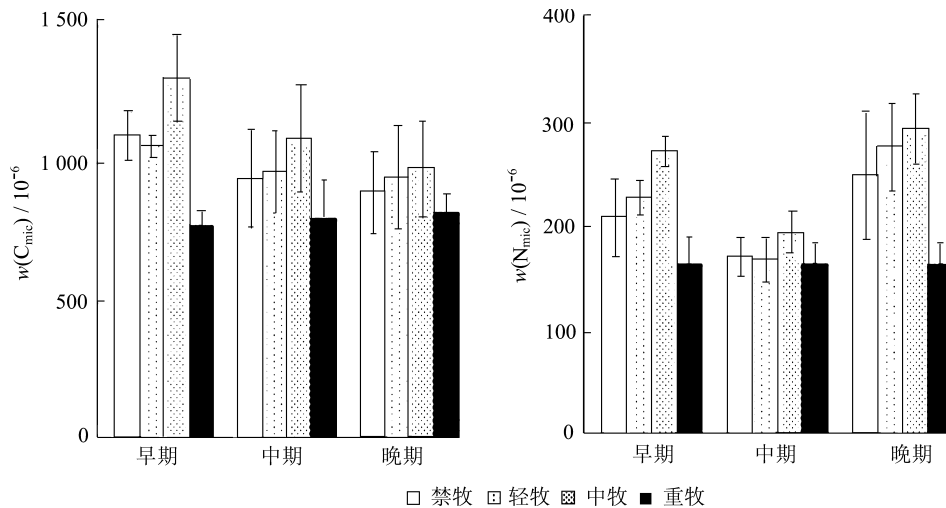


图1 不同处理下生长季早、中、晚期的 $w(C_{mic})$, $w(N_{mic})$ 变化

Figure 1 $w(C_{mic})$, $w(N_{mic})$ in soil under different treatments during the early, mid and the late growing season

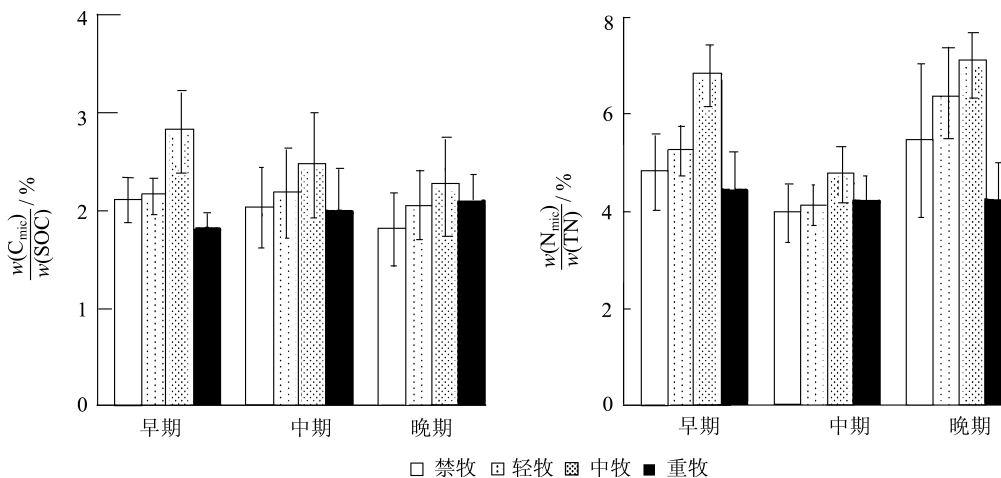


图2 不同处理下生长季早、中、晚期土壤 $w(C_{mic})/w(SOC)$ 和 $w(N_{mic})/w(TN)$

Figure 2 $w(C_{mic})/w(SOC)$ and $w(N_{mic})/w(TN)$ in soil under different treatments during the early, mid and the late growing season

间无显著差异, 而重牧处理下的代谢熵与其他处理下该指标差异显著($P < 0.001$), 且明显高于其他处理(图 3)。

不同放牧处理下的微生物量 $w(C)/w(N)$ 不存在显著差异, 其变化范围为 4.97~5.87。

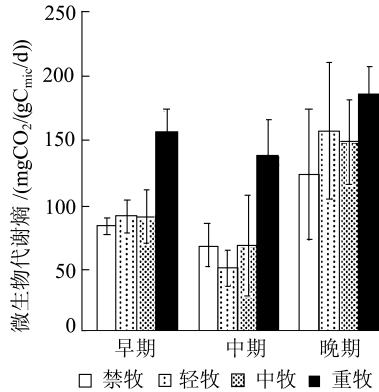


图 3 不同处理下生长季早、中、晚期的土壤微生物代谢熵

Figure 3 Microbial metabolic quotient in soil under different treatments during the early, mid and late growing season

4 讨论

4.1 放牧对土壤 $w(C_{mic})$, $w(N_{mic})$ 的影响

微生物量是土壤活性养分的库和来源^[13-14], 当总的有机质没有明显变化时, 它的活性组份可能会在干扰压力下明显降低^[15-16]. Shrestha 等^[16]发现, 土壤微生物量碳对放牧干扰的反应要比有机碳敏感; 而我们的结果也显示, 放牧强度对微生物量碳氮均有明显影响(图 1), 这与 Cui 等^[15]和 Shrestha 等^[16]的研究结果一致; 与之不同的是我们的结果显示中等程度的放牧明显提高了微生物量 $w(C)$, $w(N)$, 这一结果与 Wang 等^[17]对亚热带草地和 Bardgett 等^[18]对温带草地的观测一致。

结果显示: 在生长季的早、中、晚期, 中牧处理对 $w(C_{mic})$, $w(N_{mic})$ 均有显著的促进效应(图 1), 这是在营养含量丰富的草原土壤中所预期的. 放牧牲畜的践踏将有机质混合入土壤, 同时通过粪尿输入活性成分, 这样刺激了新的根生物量的产生以及来自根的更多的活性碳分泌物, 以上这些形成了对微生物生长有利的有较多资源的环境^[17]. 而 Bardgett 等^[18]的结果指出草地上放牧显著提高了微生物量, 可能是因为土壤碎屑输入的质量和数量的变化。

4.2 放牧对 $w(C_{mic})/w(SOC)$ 的影响

微生物熵 $w(C_{mic})/w(SOC)$ 是微生物对碳累积

潜力的一项指标, 是监测土壤有机质的有用参数, 可以对土壤质量的变化提供有效的早期示警^[19]. 中牧处理土壤中较高 $w(C_{mic})/w(SOC)$ 的出现是由于累积于土壤中的较多的有机质和更合适的环境利于微生物生长, 适度的物理扰动和有效的土壤有机碳利于微生物的增殖^[16]. 结果显示: $w(N_{mic})/w(TN)$ 要大于 $w(C_{mic})/w(SOC)$, 这证明在我们的研究区域有较多的可代谢 N 固定于微生物细胞, 这与 Shrestha 等^[16]的结果一致. N 固定于微生物可以有效地减少系统中 N 的损失^[20].

4.3 放牧对代谢熵的影响

代谢熵 (qCO_2) 反映了微生物群落的维持能大小和对基质的利用效率等微生物群落生理上的特征^[21], 揭示了土壤的发生过程、生态演变以及对环境胁迫的反应^[22]. 重牧处理区较高的 qCO_2 表明: 1) 该区的微生物在生态系统受到胁迫时将更多的碳能用于细胞完整性的维持^[19, 23]. 2) 土壤团聚体破碎后微生物对释放出来的有效碳产生激烈竞争^[24], 说明此时微生物的代谢活性较高, 对基质的利用率也高; 较大的微生物库对应于较低水平的微生物活性(图 1, 3), 这表示在中等程度的放牧下, 非代谢活性的微生物在生物量库中占优势; 而在重度放牧区, 以较高的 qCO_2 值存在的代谢活性菌群暗示了可矿化碳库较高的可分解程度^[23].

4.4 不同处理下的 $w(C_{mic})/w(N_{mic})$

在研究区域, 不同放牧处理间的微生物量 $w(C)/w(N)$ 不存在显著差异, 象征着放牧对微生物群落结构没有明显的作用. Jenkinson^[25]和 Harris 等^[26]指出, $w(C_{mic})/w(N_{mic})$ 为 7~12 的是真菌, 为 3~6 的是细菌. 我们的研究中 $w(C_{mic})/w(N_{mic})$ 为 4.97~5.87, 显示土壤微生物有较大的潜力释放氮素, 表明在我们的研究区域细菌在微生物量中占主导. 这是因为真菌易于在酸性土壤中生存, 而细菌更适于在 pH 值较高(中性或偏碱性)的土壤中起支配作用^[27-28]. 根据中国土壤的划分标准 (pH 5.0~6.5 为酸性土; pH 6.5~7.5 为中性土), 该研究地土壤接近中性^[29].

4.5 植物地上生物量、土壤养分与微生物量之间的关系

植物生物量、土壤养分与微生物量之间没有显著的相关性, 这与 Shrestha 等^[16]和 Sun 等^[30]的结果不同. 这可能与不同生态系统的不同生态环境有关. 在我们的研究地区, 尽管禁牧和轻牧处理区有较高的植物生物量(地上植被利用率较低)和土壤养分, 但它们的微生物量质量分数低于中牧

处理的土壤。这是由于如上的环境缺少对微生物来讲合适和必要的刺激,同时,可能存在植物和微生物之间对土壤碳氮元素的竞争。而重牧处理下,由于过度的放牧,导致植被凋落物和根残余的减少,土壤肥力降低以及风蚀,从而限制了微生物的生长及其对土壤碳氮元素的累积。赵吉等^[31]的研究也表明适度的干扰能增加微生物碳的质量分数,同时加快养分的循环,而过度干扰则导致土壤微生物数量和生物量的降低^[32]。

参考文献

- [1] 张蕴薇, 韩建国, 韩永伟, 等. 不同放牧强度下人工草地土壤微生物量碳、氮的含量[J]. 草地学报, 2003, 11(4): 342-345.
- [2] 王启兰, 王长庭, 杜岩功, 等. 放牧对高寒嵩草草甸土壤微生物量碳的影响及其与土壤环境的关系[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 39-46.
- [3] 仁青吉, 武高林, 任国华. 放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植物群落特征的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 256-261.
- [4] 董世魁, 丁路明, 徐敏云, 等. 放牧强度对高寒地区多年生混播禾草叶片特征及草地初级生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(1): 136-142.
- [5] 高永恒, 陈槐, 罗鹏, 等. 放牧强度对川西北高寒草甸植物生物量及其分配的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 26-32.
- [6] 王明君, 韩国栋, 崔国文, 等. 放牧强度对草甸草原生产力和多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5): 862-868.
- [7] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. 中国草地, 2001, 23(4): 41-47.
- [8] 武高林, 任国华, 刘振恒, 等. 黄河首曲湿地功能区“黑土滩”退化草甸恢复改良[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 48-52.
- [9] 陈懂懂, 张世虎, 杜国祯. 青藏高原东缘不同海拔梯度土壤微生物量与氮矿化的潜力[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 86-90.
- [10] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 42-48, 207-211.
- [11] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 20-169.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 农业科技出版社, 2000: 228-233.
- [13] SINGH J S, RAGHUBANSHI A S, SINGH R S, et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna[J]. Nature, 1989, 338(6215): 499-500.
- [14] MAZZARINO M J, BERTILLER M B, SAIN C, et al. Soil nitrogen dynamics in northeastern Patagonia steppe under different precipitation regimes[J]. Plant Soil, 1998, 202(1): 125-131.
- [15] CUI Xiao-yong, WANG Yan-fen, NIU Hai-shan, et al. Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia[J]. Ecological Research, 2005, 20(5): 519-527.
- [16] SHRESTHA G, STAHL P D. Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe: effects of long-term grazing exclusion[J]. Agriculture Ecosystem & Environment, 2008, 125(1/4): 173-181.
- [17] WANG H K, MCSORLEY R, BOHLEN P, et al. Cattle grazing increases microbial biomass and alters soil nematode communities in subtropical pastures[J]. Soil Biology Biochemistry, 2006, 38(7): 1956-1965.
- [18] BARDGETT R D, LEEMANS D K, COOK R, et al. Seasonality in the soil biota of grazed and ungrazed hill grasslands[J]. Soil Biology Biochemistry, 1997, 29(8): 1285-1294.
- [19] YAN Ting-mei, YANG Lin-zhang, CAMPBELL C D. Microbial biomass and metabolic quotient of soils under different land use in the three gorges reservoir area[J]. Geoderma, 2003, 115(1): 129-138.
- [20] TONON G, BOLDREGHINI P, GJOACCHINI P. Seasonal changes in microbial nitrogen in an old broad leaf forest and in a neighboring young plantation[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, 41(2): 101-108.
- [21] 唐玉姝, 魏朝富, 颜廷梅, 等. 土壤质量生物学指标研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(2): 157-163.
- [22] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 矿区重金属污染对土壤环境质量微生物学指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 60-63.
- [23] MOSCATELLI M C, DITIZIO A, MARINARI S, et al. Microbial indicators related to soil carbon in Mediterranean land use systems[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(1): 51-59.
- [24] PAUSTIAN K, SIX J, ELLIOTT E T, et al. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 147-163.
- [25] JENKINSON D S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil[M]//WILSON J R. Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems. Wallingford: Commonwealth Agricultural Bureau International, 1988: 368-386.

(下转第81页)

在上式中令 $m \rightarrow 0$, 得

$$\int_0^T \langle u, \phi''(t) \rangle dt - \int_0^T \langle \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \phi(t) \rangle dt + \alpha \int_0^T \langle u'_x, \phi(t) \rangle dt + \beta \int_0^T \langle u', \phi(t) \rangle dt + \int_0^T \langle f(u), \phi(t) \rangle dt = \int_0^T \langle h, \phi(t) \rangle dt + \langle u'(0), \phi'(0) \rangle - \langle u(0), \phi(0) \rangle. \quad (10)$$

再用 $\phi(t)$ 作用极限方程 (9) 的两端并进行分部积分可得

$$\int_0^T \langle u, \phi''(t) \rangle dt - \int_0^T \langle \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \phi(t) \rangle dt + \alpha \int_0^T \langle u'_x, \phi(t) \rangle dt + \beta \int_0^T \langle u', \phi(t) \rangle dt + \int_0^T \langle f(u), \phi(t) \rangle dt = \int_0^T \langle h, \phi(t) \rangle dt + \langle u_1, \phi'(0) \rangle - \langle u_0, \phi(0) \rangle. \quad (11)$$

比较 (10) 式与 (11) 式即得 $u(0) = u_0, u'(0) = u_1$.

最后惟一性和解对初值的连续依赖性由 f 的假设可得.

推论 1 对任意 $(u_0, u_1) \in \mathcal{E}_0, t \geq 0$, 定义

$$S(t)(u_0, u_1) = (u(t), u'(t)).$$

则 $S(t)$ 确定了 $\mathcal{E}_0 \mapsto \mathcal{E}_0$ 上的半群, 且 $S(t): \mathcal{E}_0 \mapsto \mathcal{E}_0$ 是连续的.

参考文献

- [1] YANG Zhi-jian. Global existence, asymptotic behavior and blowup of solutions for a class of nonlinear wave equation with dissipative term[J]. Journal of Differential Equations, 2003, 187(2): 520–540.
- [2] TEMAM R J. Infinite-dimensional dynamical systems in mechanics and physics[M]. New York: Spriger-Verlag, 1997: 202–226.
- [3] GEORGE R S, YOU Yun-cheng. Dynamics of evolutionary equations[M]. New York: Springer-Verlag, 2002: 284–299.
- [4] AYFER Kurt. Existence of absorbing set for a nonlinear wave equation[J]. Applied Mathematics E-Notes, 2002(2): 98–101.
- [5] ZHANG Yan-hong, ZHONG Cheng-kui. Existence of global attractors for a nonlinear wave equation[J]. Applied Mathematics Letters, 2005, 18(1): 77–84.
- [6] JAMES C R. Infinite-dimensional dynamical systems: an introduction to dissipative parabolic PDEs and the theory of global attractors[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

(责任编辑: 张 勇)

(上接第 77 页)

- [26] HARRIS D, VORONEY R P, PAUL E A. Measurement of microbial biomass N:C by chloroform fumigation incubation[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1997, 77(5): 507–514.
- [27] KEMMITT S J, WRIGHT D, GOULDING K W T, et al. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils[J]. Soil Biology Biochemistry, 2006, 38(5): 898–911.
- [28] LI Xiao-gang, RENGEL Z, MAPFUMO E, et al. Increase in pH stimulates mineralization of 'native' organic carbon and nitrogen in naturally salt-affected sandy soils[J]. Plant and Soil, 2007, 290(1/2): 269–282.
- [29] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 171–179.
- [30] SUN Geng, LUO Peng, WU Ning, et al. *Stellera chamaejasme* L. increases soil N availability, turnover rates and microbial biomass in an alpine meadow ecosystem on the eastern Tibetan plateau of China[J]. Soil Biology Biochemistry, 2009, 41(1): 86–91.
- [31] 赵吉, 廖仰南, 张桂枝, 等. 草原生态系统的土壤微生物生态[J]. 中国草地, 1999, 21(3): 57–67.
- [32] 高英志, 韩兴国, 汪诗平. 放牧对草原土壤的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 790–797.

(责任编辑: 王春燕)