

放牧侵蚀研究回顾与展望*

林慧龙 龙瑞军** 任继周

(兰州大学青藏高原生态系统管理国际中心, 草地农业科技学院, 兰州 730020)

摘要 纵观土壤侵蚀研究的历史, 风蚀和水蚀被认为是土壤侵蚀的主要形式。尽管近年来耕作侵蚀研究取得了巨大进展, 但迄今放牧侵蚀研究较少。本文探讨了放牧侵蚀研究的意义, 回顾了国内外研究现状和存在的问题, 提出放牧侵蚀是由于草原动物的直接作用而导致在过牧草地上土壤物质的重新分配。放牧侵蚀作为过度放牧的指示向量, 是一个今后值得大力研究的领域, 这不仅有益于草地载畜量评定、碳素减源增汇研究, 而且在草地退化程度诊断和退化草地治理中具有重要指示意义。

关键词 放牧生态系统; 土壤侵蚀; 放牧侵蚀; 草地载畜量; 放牧侵蚀阈值

中图分类号 S812 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2008)12-0000-00

Grazing-induced erosion : review and prospect. LIN Hui-long , LONG Rui-jun , REN Ji-zhou (College of Pastoral Agriculture Science and Technology , International Center for Tibetan Plateau Ecosystem Management , Lanzhou University , Lanzhou 730020 , China). *Chinese Journal of Ecology* 2008 27(12) 1-.

Abstract : Historically , water and wind erosions were assumed to be the major forms of soil erosion. Though the studies of tillage-induced erosion have been developed greatly in recent years , few studies were made on grazing-induced erosion. This paper discussed the significance of the research on grazing-induced erosion , and reviewed the current status and existed problems of the research , based on both domestic and foreign researches. Grazing-induced erosion induces the redistribution of soil matters on overgrazing grassland as a direct result of animals. As a vector of overgrazing , grazing-induced erosion is a study area which deserves greater attention in the future. The research on grazing-induced erosion not only benefits the determination of livestock carrying capacity and the increase of soil carbon sequestration , but also has an indicative meaning on diagnosing the degradation degree of grassland and on managing degraded grassland.

Key words : grazing ecosystem ; soil erosion ; grazing-induced erosion ; livestock carrying capacity ; grazing-induced erosion threshold.

水土流失是全球面临最突出的土地退化问题, 全球约 80% 的土壤侵蚀发生在草地(Pimentel *et al.* ,1995)。但放牧导致的土壤侵蚀研究未受重视(Evans 2005)。

纵观土壤侵蚀研究的历史, 形成的众多土壤侵蚀预测模型(如, Universal Soil Loss Equation、Revised Universal Soil Loss Equation、Water Erosion Prediction Project model、Wind Erosion Equation、Revised Wind Erosion Equation 等)不能模拟放牧家畜对土壤侵蚀的长期影响, 因而在放牧草地土壤侵蚀研究的实际

中可操作性和可利用性较差(Hoffmann *et al.* , 2007)。

随着 20 世纪 90 年代, 对于耕作侵蚀(tillage erosion)的再认知, 发现传统地将耕地土壤侵蚀只是简单地理解为风蚀和水蚀是不完整的, 耕作是耕地遭受侵蚀的主要诱因之一(Van Muysen *et al.* , 2002 ; Zhang *et al.* , 2004)。农学家们(如 Lindstrom *et al.* , 1990 ; Lobb & Kachanoski ,1999 ; Dercon *et al.* , 2007)发现耕作侵蚀是耕地土壤物质由于耕作机具的直接作用或耕作的农艺措施作用而发生在耕地地块内空间上的再分布, 是在年复一年的长期耕作过程中, 产生相当可观的不均匀的净侵蚀的现象(Sheng *et al.* , 2007a , 2007b)。并形成了一些耕作侵蚀模型(tillage

* 国家自然科学基金重点资助项目(30730069)。

** 通讯作者 E-mail : Longrj@lzu.edu.cn

收稿日期 : 2008-01-23 接受日期 : 2008-09-12

erosion models (Lobb & Kachanoski, 1999; de Alba *et al.*, 2006) 很好地解释了水蚀和风蚀过程无法解释的耕作土壤重新分布的格局。由于耕作侵蚀研究的巨大进展, 引发了耕作制度的一场绿色革命, 使得以少耕、免耕、地表微地形改造技术及地表覆盖等保护性耕作 (Conservation tillage) 技术得以兴起和广泛应用 (Lal *et al.*, 2004; Brickleymer *et al.*, 2006; 伍芬琳等, 2007)。

可以类比的是, 草地系统作为一种“有畜”农业, 有别于耕地系统, 放牧草地的土壤侵蚀亦非风蚀、水蚀和耕作侵蚀可以概括, 因此, 放牧侵蚀 (grazing erosion or grazing-induced erosion) 研究也势必要提上研究日程。本文对放牧侵蚀的涵义、研究现状、放牧侵蚀研究的重要性及前瞻性研究方向进行了综述。

1 放牧侵蚀的涵义

在放牧生态系统中, 放牧家畜作用于 3 个层片结构: 植物地上部分层片、生草土层片和植物地下部分层片。在适牧状态, 草-畜是协同进化的矛盾统一体, 一旦放牧率超越放牧率阈值, 即进入过度放牧状态。过度放牧初期, 家畜的主要作用凸现在对植物群落功能和结构的作用, 只是在过度放牧的后期, 家畜蚕食了植物地上部分层片的主体, 导致生草土与植物地下根系相悖, 生草层秃斑突现, 也为鼠类的侵入创造了条件, 土壤侵蚀才突出表现为矛盾的主要方面 (图 1) (Evans, 1997; Zhao *et al.*, 2005), 土壤侵蚀加剧的关键因素是放牧家畜 (Evans, 2005; Pietola *et al.*, 2005), 因此不能将放牧地土壤侵蚀简单地归因于水蚀或风蚀的单方作用。放牧地的总土壤侵蚀是由于过度放牧这一内因与水力和风力等外因共同作用产生的, 其侵蚀强度大小的空间变化取决于地形等因素的综合影响。显然, 内因是问题的根本。因此, 放牧侵蚀是在过牧草地上, 草地侵蚀微斑块和土壤物质由于草原动物 (主要指放牧家畜, 也包括草原鼠类等) 的直接作用以及放牧制度的共同作用而发生在过牧草地地块内空间格局上重新分布和导致净土壤的重新分配。放牧侵蚀的研究目标是探索放牧对土壤的生物物理过程的影响机制和土-草-畜界面耦合过程的作用机制, 揭示侵蚀微斑块形成、演替的空间变化规律及其机制, 探索放牧侵蚀控制措施, 以维护草地生态系统的生态生产力。显然, 放牧侵蚀控制措施将是放牧精确化管理的关键。

2 放牧侵蚀研究现状与存在问题

关于植被在防治草地土壤侵蚀中的作用, 进行了大量研究 (Wasson & Nanninga, 1986; Fullen, 1998; 许志信等, 2001)。但此类研究并没有完全与放牧利用相结合, 这固然有受到耕地土壤侵蚀研究传统方法的羁绊。脱离放牧利用的草地土壤侵蚀研究至少是偏颇的。而且, 即使盖度相同的正常草地和退化草地对土壤侵蚀动态正、反向驱动是不平衡性的。Evans (2005) 报道, 在英国中部, 相同的放牧强度在坡底和坡顶却产生了截然相反的结果。坡底的放牧践踏羊蹄斑 (sheep scars) 很快就被植被覆盖, 而在坡顶羊蹄斑使土壤更容易受到侵蚀, 即使明显地降低放牧强度, 但表层土壤的消失难以挽回。

草地的退化阶段多处在以植被退化为主的阶段, 在这一阶段, 尽管植被变化很明显, 甚至植被群落发生了完全的逆行演替, 但其对土壤的保护作用仍然维持在一定水平。因此, 此时土壤还不能体现出明显的变化。这也是在草地退化的研究中会忽略放牧侵蚀的原因 (闫玉春和唐海萍, 2008)。在许多发展中国家, 由于过度放牧, 引起水土流失的案例比比皆是。即使在美国, 54% 的放牧草地, 也正遭受过度放牧, 而处在高土壤侵蚀威胁之下 (Byington, 1986)。据许志信和赵萌莉 (2001) 研究, 过度放牧是土壤侵蚀过程中的主要人为因素, 特别是我国传统牧区由于长期过牧, 土壤侵蚀作用日益加强, 导致草原退化引起的风蚀和沙漠化危害尤为严重。但利用放牧试验来定量研究放牧侵蚀机理的报道极少 (Evans, 2005)。

由于对草地土壤侵蚀研究重视不够、经费的限制等原因, 使得对放牧侵蚀机理研究大大滞后于耕作侵蚀研究。需要强调说明的是, 在放牧生态系统中, 土壤-牧草-家畜是一个整体, 它们互相影响, 互相制约, 放牧草地土壤侵蚀问题是一个自然-社会复合系统的特殊复杂过程。草地土壤侵蚀除受到和耕地系统同样的自然因素的影响外, 还受到放牧家畜的影响。系统论的一个重要观点是系统要素在系统中相互作用, 会产生整体新质, 放牧家畜迭加于自然因子后, 草地系统会产生强烈的系统响应, 使得草地土壤侵蚀机理呈现有别于耕地系统的错综复杂的生态动力关系 (Lal & Stewart, 1990; Pimentel, 1993; 雷阿林等, 1996), 但相关研究还相当薄弱。评价放牧地侵蚀状况时必须把放牧侵蚀模型研究放在首位,

才会得到较为准确的结果。此类模型有别于传统的水蚀或风蚀模型,而是带有放牧特色的新质的模型,这为草业学术界提出了新的挑战,同时也提供了原始创新性研究和孕育创新成果的机遇。

3 放牧侵蚀研究重要性展望

3.1 从防止草地土壤侵蚀的视角考察草地载畜量

基于草地牧草生产力框架下的载畜量,尽管在指导草地畜牧业中发挥着重要作用,但往往忽略了牲畜放牧对草地土壤侵蚀的潜在影响。例如,Barker等(1999)发现,在同一草地上以相同的载畜量放牧的牛和羊,前者的践踏对土壤的影响是后者的2倍,这意味相同的载畜量不同畜种对草地土壤侵蚀的潜在影响相去甚远;Evans(1998)在美国黄石国家公园观察到,尽管草地还有足够的牧草来供养所放牧的牲畜(牲畜数量并未超过牧草所能承载的载畜量),但这些牲畜的放牧已经在草地上产生了许多土壤裸露斑块(牲畜数量已经超过了防止土壤侵蚀意义下的载畜量)。因此,仅仅根据草畜的供求关系管理放牧系统远远不够,牲畜对草地土壤侵蚀的生态破坏效应也应该在载畜量概念的考察范围之内。显然,科学载畜量的评定是需要建立在对草地放牧侵蚀机理掌控的基础之上的,这必将成为草业学术界应解决的关键科学问题。

3.2 放牧地碳素减源增汇研究的关键

放牧地存储了全球土壤有机碳的10%~30%(Schumana *et al.*, 2002),面对如此巨大的碳库,研究减少放牧地温室气体排放和增加放牧地土壤碳贮量(increase soil C sequestration)具有全球意义。显然,放牧管理对土壤碳储量当前和潜在的影响是放牧生态学必须面对的课题。

与未放牧草地相比,适度放牧的草地具有土壤碳增汇的效果(Schumana *et al.*, 2002)。Povirk(1999)在美国怀俄明州的高山草甸上的实验也证实,放牧可显著地增加土壤碳储量,在放牧处理的0~7.5 cm土壤碳储量比对照高4.5%。Fernandez等(2008)通过在美国犹他州半干旱草地适牧与过牧的对比研究发现,在植被盖度下降20%的情况下,伴随土壤流失,土壤有机碳的流失量高达100%,说明土壤有机碳对过度放牧的敏感性高于植被盖度。过度放牧引起的放牧侵蚀必然导致放牧地土壤碳的再分布,侵蚀源-汇区的土壤有机质矿化速率不同则引起碳储量变异。例如,放牧侵蚀源区

的土壤碳失量大于沉积区的获得量,则在研究区范围内造成了碳排放。由此可见,过度放牧条件下科学解译土壤碳动态是建立在掌握放牧侵蚀机理基础之上的。

从土壤形成过程来看,土壤的自然演替是一个极其漫长的过程。草原土壤中有机质的半衰期为500~1000年,因此现实中所注意的土壤侵蚀并非是一个自然退化演替过程(闫玉春和唐海萍, 2008)。随着对侵蚀土壤从物理性质逐渐向有机成分研究的过渡,放牧侵蚀对草地碳素的影响也日益得到关注,但放牧系统受到诸如放牧制度、生境变异等因素的影响而呈现出生态复杂性,使得该项研究尚处初创阶段,放牧侵蚀对碳流失的生态影响尚未有量化的结论(Franzluebbers, 2005; McTainsh & Strong, 2006),但不可否认,放牧侵蚀研究将成为放牧地碳素减源增汇研究的关键。

3.3 过度放牧和草地退化的评判标准

长期以来,放牧管理都是从植被和放牧家畜生产力的角度来考察“过度放牧”,这不仅悖于草业科学的初衷(龙瑞军, 2007),而且忽略了放牧侵蚀的影响(Evans, 1997, 2005),长期以来模糊了对“过度放牧导致草地退化”这一公认结论的动力学机制的认识,为此将过度放牧进一步细分为过度放牧状态和放牧侵蚀状态(图1)。不妨用有序度(任继周等, 2000)作为草原退化的标尺,来探讨放牧侵蚀在草地退化中的地位与作用。适度放牧可以提高草地的有序度,草-畜协同进化,草地表现为健康和谐;但放牧率一旦超越放牧率阈值(图1, A点)即发生了超载过牧,过度放牧初期,家畜的主要作用凸现在对植物群落功能和结构的作用,草地表现为亚健康;只是在过度放牧的后期(跨越图1, B点),家畜蚕食了植物地上部分层片的主体,导致生草土与植物地下根系相悖,生草层秃斑突现,也为鼠类的侵入创造了条件,放牧侵蚀才突出表现为矛盾的主要方面(Evans, 1997; Zhao *et al.*, 2005; 刘桂霞和韩建国, 2006),草地表现为不健康,侵蚀微斑块的进一步发展(跨越图1, C点),使草地更容易受到侵蚀,加重了土壤系统的脆弱性,即使明显地降低放牧强度,但表层土壤的流失实际上是不可避免的,也是难以挽回的,草地趋向系统崩溃。在A、C两点之间,草地处于被动退化阶段,以植被退化为特征(闫玉春和唐海萍, 2008),若给予休养生息,尚可康复;但在跨越了放牧侵蚀阈值(图1, C点)后草地将不可避免

的由被动退化阶段进入主动退化阶段。综上所述,草地退化过程经由健康、亚健康、不健康和系统崩溃 4 个时期,可以划分为:适牧、被动退化和主动退化 3

个阶段,显然,放牧侵蚀阈值是分异草地由被动退化到主动退化的临界值(图 1),在草地退化程度诊断和退化草地治理中具有重要指示意义。

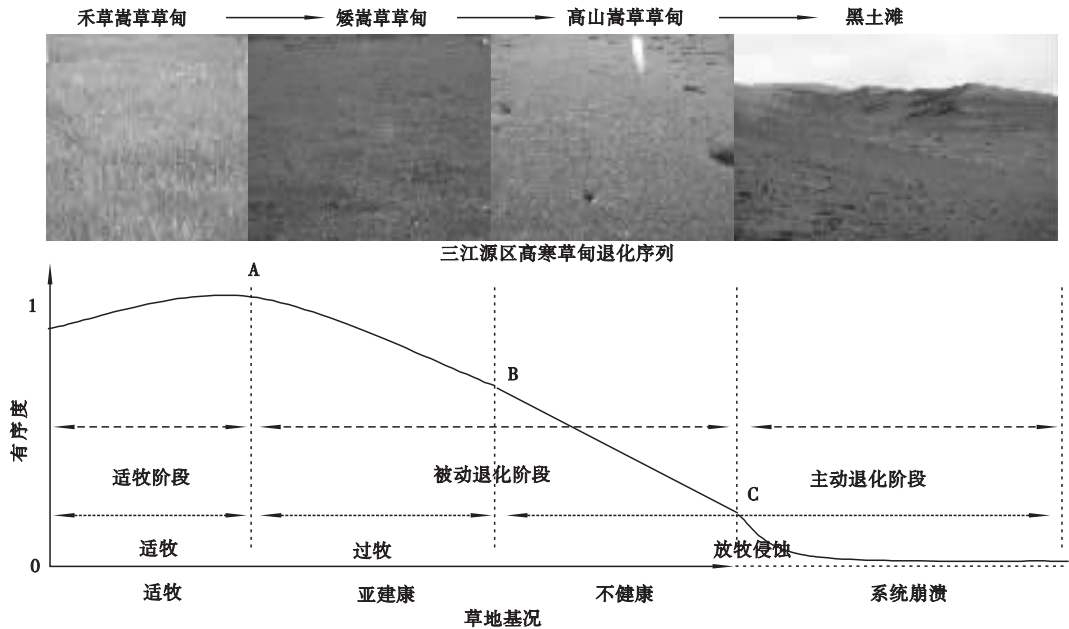


图 1 草地退化阶段示意图

Fig. 1 Sketch map of grassland degradation

A-放牧率阈值, B-过度放牧阈值, C-放牧侵蚀阈值。

为了给草地退化过程的 4 个时期 3 个阶段给予更为清晰地阐释,以三江源区高寒草甸退化序列为例做以下补充说明。致力于三江源区高寒草地的研究,发现在过度放牧压力的持续作用下,占源区草地总面积 76% 的高寒草甸,由顶极至崩溃的退化过程表现为 4 个时期(尚占环等, 2005, 2006; 龙瑞军, 2007; 曹广民等, 2007),即禾草嵩草草甸-矮嵩草草甸-高山嵩草草甸-次生裸地(黑土滩)。禾草嵩草草甸是源区高寒草甸的顶极类型,由于过度放牧,使得禾草嵩草草甸向矮嵩草草甸退化,矮嵩草草甸-高山嵩草草甸退化过程,斑驳出现,鼠害入侵;此两个退化过程“外力”的作用占主导地位,是谓被动退化阶段。在被动退化阶段,应及时采取措施,降低放牧压力、灭鼠、实施围栏封育、灌溉、施肥等改良措施进行休养恢复(周华坤等, 2008);从高山嵩草草甸-黑土滩的退化过程“内因”的成分居优势,是主动退化阶段(图 1)。一旦进入主动退化阶段,最终形成次生裸地黑土滩,趋势不可避免,逆转很难实现。大量的试验研究证明,单一的禁牧封育无法完全恢复三江源区“黑土型”退化草地,草地放牧演替并不呈现“单稳态(mono-stable state)”模式,而呈现“多稳

态(multiple stable state)”模式(Westoby *et al.*, 1989)。有关高寒嵩草草甸的退化,现有的研究均笼统地归因于超载放牧和鼠类活动的破坏,而没有从放牧侵蚀的角度,阐释放牧侵蚀在草地退化中的地位 and 作用,这也是造成退化高寒草地的治理收效甚微的原因之一,这反映了对放牧侵蚀与草地退化之间的关系了解的深度还不够。因此,针对三江源区草地生态系统修复与维系问题,必须从退化序列上分异被动与主动退化模式,揭示发生被动与主动退化的动力学机制及调控机理,引入状态与过渡模型(state-and-transition model)(Westoby *et al.*, 1989; Bestelmeyer *et al.*, 2003; Briske *et al.*, 2003; Stringham *et al.*, 2003),从放牧侵蚀视角,展开探索与研究,才有可能得出相对准确的结论和行之有效的对策。

4 结语

放牧侵蚀是草地侵蚀斑块和土壤物质由于草原动物的直接作用以及放牧制度的共同作用而发生的,在过牧草地地块内空间格局上重新分布和导致净土壤的重新分配的现象。无论研究范畴与研究方法都

与耕作侵蚀有本质区别。因此,研究的方法论创新和放牧侵蚀机理模型构建至关重要。

青藏高原三江源区是我国生态系统最脆弱的地区和高寒草地生态系统土壤侵蚀最严重的地区。其高寒性、敏感性、脆弱性造就了世界性的生态系统修复、维系与管理难题。从综合生态系统管理的角度出发,利用生态学、草地学、畜牧学、土壤学和数学模型等学科交叉优势和试验方法,针对植物-家畜-土壤之间互动机制及其与环境因子之间的联动过程,围绕草丛与地境界面以及草地与家畜界面,从“高寒草甸由顶级至崩溃的退化”“多稳态模式”入手,以放牧侵蚀为指标,用侵蚀模数在退化序列上的空间分布序列推断其在时间上演化的方法,定量研究各种因素对放牧侵蚀影响的消长规律以及各种因素之间的关联特性,构建退化序列上放牧侵蚀的状态和过渡模型,可为退化高寒草甸生态系统的修复、维系和管理提供科学依据。

对放牧侵蚀及其重要性的认识必将对草业工作者提出更多的机遇和挑战。放牧管理必须包括放牧侵蚀控制措施,才能具备完整性和综合性。采用和保证一种崭新的“过度放牧”和“草地退化”评价方法需要我们对放牧侵蚀机理做出精确化评估,尚有许多问题需做进一步的研究。面对这些机遇和挑战,应该清醒地认识到,放牧侵蚀的研究地位应不小于耕作侵蚀,甚或更为重要。

参考文献

曹广民,杜岩功,梁东营,等. 2007. 高寒高草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理. *山地学报*, **25**(6):641-648.

雷阿林,史衍玺,唐克丽. 1996. 土壤侵蚀模型实验中的土壤相似性问题. *科学通报*, **41**(19):1801-1804.

刘桂霞,韩建国. 2006. 草地生态学领域空斑研究进展. *生态学杂志*, **25**(9):1136-1140.

龙瑞军. 2007. 青藏高原草地生态系统之服务功能. *科技导报*, **25**(9):26-28.

任继周,南志标,郝敦元. 2000. 草业系统中的界面论. *草业学报*, **9**(1):1-8.

尚占环,龙瑞军,马玉寿. 2006. 江河源区“黑土滩”退化草地特征、危害及治理思路探讨. *中国草地学报*, **28**(1):69-74.

尚占环,龙瑞军. 2005. 青藏高原“黑土型”退化草地成因与恢复问题的研究评述. *生态学杂志*, **24**(6):652-656.

伍芬琳,李琳,张海林,等. 2007. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响. *生态学杂志*, **26**(12):2035-2039.

许志信,张晓明,白飞,等. 2001. 草甸草原植被利用强

度对水土流失影响的研究. *内蒙古农业大学学报*, **22**(1):68-73.

许志信,赵萌莉. 2001. 过度放牧对草原土壤侵蚀的影响. *中国草地*, **23**(6):59-63.

闫玉春,唐海萍. 2008. 草地退化相关概念辨析. *草业学报*, **17**(1):93-99.

周华坤,赵新全,赵亮,等. 2008. 青藏高原高寒草甸生态系统的恢复能力. *生态学杂志*, **27**(5):697-704.

Barker DJ, Betteridge K, Budding PJ, et al. 1999. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. *Australian Journal of Soil Research*, **37**:743-760.

Bestelmeyer BT, Brown JR, Havstad KM, et al. 2003. Development and use of state-and-transition models for rangelands. *Journal of Range Management*, **56**:114-126.

Brickleyer RS, Lawrence RL, Miller PR, et al. 2006. Predicting tillage practices and agricultural soil disturbance in north central Montana with Landsat imagery. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **114**:210-216.

Briske DD, Fuhlendorf SD, Smeins FE. 2003. Vegetation dynamics on rangelands: A critique of the current paradigms. *Journal of Applied Ecology*, **40**:601-614.

Byington EK. 1986. *Grazing Land Management and Water Quality*. Harpers Ferry (WV): American Society of Agronomy and Crop Science Society of America.

De Alba SD, Borselli L, Torri D, et al. 2006. Assessment of tillage erosion by mouldboard plough in Tuscany (Italy). *Soil & Tillage Research*, **85**:123-142.

Dercon G, Govers G, Poesen J, et al. 2007. Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador. *Geomorphology*, **87**:4-15.

Evans R. 2005. Curtailing grazing-induced erosion in a small catchment and its environs, the Peak District, Central England. *Applied Geography*, **25**:81-95.

Evans R. 1997. Soil erosion in the UK initiated by grazing animals. *Applied Geography*, **17**:127-141.

Evans R. 1998. The erosional impacts of grazing animals. *Progress in Physical Geography*, **22**:251-268.

Fernandez DP, Neff JC, Reynolds RL. 2008. Biogeochemical and ecological impacts of livestock grazing in semi-arid southeastern Utah, USA. *Journal of Arid Environments*, **72**:777-791.

Franzluëbbers AJ. 2005. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Soil & Tillage Research*, **83**:120-147.

Fullen MA. 1998. Effects of grass ley set-aside on runoff, erosion and soil organic matter levels in sandy soils in east Shropshire, UK. *Soil & Tillage Research*, **46**:41-49.

Hoffmann C, Funke R, Wieland R, et al. 2007. Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, **72**:792-804.

Lal R, Griffin M, Apt J. 2004. Managing soil carbon. *Science*, **304**:393.

- Lal R , Stewart BA. 1990. Soil Degradation. New York :Springer-Verlag.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* , **304** :1623-1627.
- Lindstrom MJ , Nelson WW , Schumacher TE , *et al.* 1990. Soil movement by tillage as affected by slope. *Soil Tillage Research* , **17** :255-264.
- Lobb DA , Kachanoski RG. 1999. Modelling tillage erosion in topographically complex landscapes of southwestern Ontario , Canada. *Soil Tillage Research* , **51** :261-278.
- McTainsh G , Strong C. 2006. The role of aeolian dust in ecosystems. *Geomorphology* , **89** :39-54.
- Pietola L , Horn R , Yli-Halla M. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil & Tillage Research* , **82** :99-108.
- Pimentel D , Harvey C , Resosudarmo P , *et al.* 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* , **267** :1117-1123.
- Pimentel D. 1993. World Soil Erosion and Conservation. Cambridge : Cambridge University Press.
- Povirk K. 1999. Carbon and nitrogen dynamics of an alpine grassland : Effects of grazing history and experimental warming on CO₂ flux and soil properties. Laramie : MS thesis , Dept. Renewable Resources , University of Wyoming.
- Schumana GE , Janzen HH , Herrick JE. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution* , **116** :391-396.
- Sheng L , Lobb DA , Lindstrom MJ , *et al.* 2007a. Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using 137Cs technique and soil erosion models. *Catena* , **70** :493-505.
- Sheng L , Lobb DA , Lindstrom MJ. 2007b. Tillage translocation and tillage erosion in cereal-based production in Manitoba , Canada. *Soil & Tillage Research* , **94** :164-182.
- Stringham TK , Krueger WC , Shaver PL. 2003. State and transition modeling : an ecological process approach. *Journal of Range Management* , **56** :106-113.
- van Muysen W , Govers G , van Oost K. 2002. Identification of important factors in the process of tillage erosion : The case of mouldboard tillage. *Soil & Tillage Research* , **65** :77-93.
- Wasson RJ , Nanninga PM. 1986. Estimation wind transport sand on vegetated surface. *Earth Surface Processes and Landforms* , **11** :505-514.
- Westoby M , Walker BH , Noy-Meir I. 1989. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management* , **42** :266-274.
- Zhang JH , Lobb DA , Li Y , *et al.* 2004. Assessment of tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan , China. *Soil & Tillage Research* , **75** :99-107.
- Zhao HL , Zhao XY , Zhou RL , *et al.* 2005. Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland , Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments* , **62** :309-319.

作者简介 林慧龙 ,男 ,1965 年生 ,博士 ,副教授。主要从事生态建模、草地放牧生态及青藏高原高寒草地生态系统管理与可持续发展的教学与研究工作 ,发表论文 30 余篇。E-mail : linhuilong@lzu.edu.cn

责任编辑 刘丽娟
