

# 近30年来青海省三江源区草地的 土壤侵蚀时空分析

黄麟, 邵全琴, 刘纪远\*

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 分析了青海省三江源区草地生态系统土壤侵蚀的空间差异, 以及草地退化与土壤侵蚀的关系, 并对该区近30年来土壤侵蚀的动态变化进行描述。结果表明, 该区域微度以上土壤侵蚀面积占源区总面积的46.47%, 而草地生态系统发生微度以上土壤侵蚀的面积比例达56.04%。源区土壤侵蚀类型是以冻融侵蚀伴随着水力侵蚀或风力侵蚀的复合侵蚀为主, 分别占源区土壤侵蚀总面积的41.93%和20.48%, 侵蚀程度以轻度为主。源区土壤侵蚀受垂直地带性和区域地貌格局的影响, 水力侵蚀、风力侵蚀、冻融复合型侵蚀分别发生在3200~4600m、2800~3600m和4400m以上的海拔范围内, 以及5~25°、<3°与5~15°的坡度范围内, 与坡向关系不大。风力侵蚀和冻融复合型侵蚀的程度随海拔升高而呈增加趋势, 而水力侵蚀则呈下降趋势。对20世纪70年代中后期-90年代初、90年代初-2004年两个时段土壤侵蚀的比较发现, 20世纪90年代以来三江源区的土壤侵蚀状况在前期加剧的情况下更加恶化, 而气候暖干化导致的多年冻土退化和长期超载过牧导致的草地生态系统退化是造成三江源区草地生态系统土壤侵蚀加剧的主要因素。

**关键词:** 三江源区; 草地生态系统; 土壤侵蚀

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2011.00012

## 1 引言

土壤侵蚀的发生、发展作为地质、地貌、气候、土壤、植被等自然因素和人为因素共同作用下的一种动态过程, 构成了特殊的侵蚀环境背景, 并伴随着人类对自然改造能力的增强, 逐渐成为当今世界资源和环境可持续发展所面临的重要问题之一<sup>[1-3]</sup>。地质因素对土壤侵蚀的影响主要反映在地质构造背景、地层结构和地质构造运动方面, 特别是现代地质构造运动对侵蚀的影响十分显著<sup>[2]</sup>。地貌因素通过影响地表径流动力、风化壳厚度等, 直接或间接影响土壤侵蚀。诸多地貌因素中研究最多的是坡度和坡长因素, 坡度是影响降雨径流和土壤侵蚀的重要因素, 而目前对于坡长与侵蚀的关系还没有确切的定论<sup>[2,4]</sup>。气候因素中以降水量影响最大。土壤侵蚀的变化, 在几天或者几周的尺度上可能对人类福利影响甚微, 但是, 在几年或者几

十年的尺度上, 该影响就非常显著<sup>[5]</sup>。

土壤侵蚀的定量研究始于19世纪末期<sup>[2,6-7]</sup>, 早期研究侧重于野外径流小区试验, 后逐渐发展到室内试验, 并建立不同形式的土壤侵蚀预报模型<sup>[4,8]</sup>。20世纪80年代后, 对全国、大江大河、重点水土流失区和小流域进行土壤侵蚀的遥感调查与监测<sup>[9-10]</sup>。90年代后开始应用放射性核素如<sup>137</sup>Cs示踪土壤侵蚀<sup>[11-13]</sup>。就青藏高原而言, 李元寿等<sup>[14]</sup>对高寒草甸典型小流域的土壤侵蚀进行了研究, 王一博<sup>[15]</sup>研究了江河源区近42年来高海拔区的土壤侵蚀过程。然而, 模型研究缺乏对演变过程的长期观测和定量剖析以及影响侵蚀的自然与人为因素相互作用的整体分析, 方法上的限制、测定费用高和耗时长又限制了<sup>137</sup>Cs法在大尺度土壤侵蚀研究中的应用<sup>[16]</sup>, 目前, 区域尺度上的土壤侵蚀研究还没有充分利用遥感和地理信息系统的潜力。

人类对自然植被的破坏是影响土壤侵蚀的最

**收稿日期:** 2010-05-07; **修回日期:** 2010-11-02.

**基金项目:** 中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-06-03); 国家科技支撑计划(2006BAC08B00)。

**作者简介:** 黄麟(1981-), 女, 四川宜宾人, 博士。研究方向: 土地利用变化的生态效应。E-mail: huanglin@lreis.ac.cn

\* **通讯作者:** 刘纪远(1947-), 男, 上海人, 研究员。研究方向: 土地利用/土地覆被变化及其宏观生态效应研究。

E-mail: Liujy@igsnrr.ac.cn

重要因素,不合理的土地利用是水土流失发生的主要原因<sup>[1-2]</sup>。近几十年来,由于自然和人类活动的双重作用,三江源区植被退化和土壤侵蚀日趋加剧,已引起社会的广泛关注<sup>[17-19]</sup>。因此,对该区土壤侵蚀空间差异及近 30 年来动态状况的准确把握,可为今后三江源生态保护和生态工程建设提供重要的科学依据。本文根据遥感解译的土壤侵蚀及其他辅助数据,生成了青海三江源区复合类型的土壤侵蚀分布和土壤侵蚀变化分布图。它对分析草地退化和土壤侵蚀之间的关系,以及三江源区草地生态系统土壤侵蚀的空间差异及动态变化具有重要意义。

## 2 数据与方法

### 2.1 三江源区的地理环境

青海省三江源区是青藏高原的重要组成部分,位于昆仑山脉和唐古拉山脉之间,其间发育着阿尼玛卿山和巴颜喀拉山等山脉。其受青藏高原形成过程的影响,在地貌上呈现东低西高的特征,大部分山脉均为西北-东南走向,这种山体格局深刻地影响了三江源区的水热条件和植被发育。土壤类型以高山草甸土为主,受气候因素制约,三江源地区自然成土过程缓慢,土层薄,肥力水平低,生态系统极为脆弱,加之近 100 年来高强度的人类干扰,使得该地区的生态系统不堪重负。土壤表层受到降雨径流、风力、冻融、人类活动等外营力的作用,造成表层土壤细颗粒成分及土壤有机质等养分成分的流失,导致表面硬度和沙粒含量的增加,造成土壤导水率降低,抗侵蚀的能力减弱,出现严重的土壤侵蚀现象,加剧了水土流失和土地退化,即土壤和植被之间的系统退化问题<sup>[15]</sup>。

三江源区以草地生态系统为主,主要包括高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠、沼泽草地、温性草原等(图 1)。根据源区 2004 年的土地利用/土地覆被分析,草地生态系统面积占源区总面积的 65.37%。其中,高寒草甸占全区草地面积的 76%,广泛分布于整个三江源地区;高寒草原占全区草地面积的 23.38%,主要分布于北部的曲麻莱、玛多,以及西部的治多和唐古拉山乡;温性草原在本区分布面积较少,主要集中于东北部的兴海县;高寒荒漠主要集中于治多县和唐古拉山乡西部干旱环境地带;沼泽草地集中分布在黄河源,长江的沱沱河、楚玛尔

河、当曲河三源头,澜沧江河源。从草地覆盖度来说,高覆盖度草地占源区草地生态系统总面积的 38.02%,集中分布于水热条件较好的东部和中南部地区,草被生长茂密,草地覆盖度在 50%以上;中覆盖度草地占 21.39%,集中分布于人类活动较强而且水分条件较差的达日、杂多县局部地区,这些区域人类活动较强而且水分条件较差,草被较稀疏,覆盖度在 20%~50%之间;而低覆盖度草地占 40.60%,多分布于水分条件欠缺的西部和北部地区,如唐古拉山乡、治多西部、曲麻莱北部、玛多北部等,这些区域水分条件欠缺、草被稀疏,覆盖度在 5%~20%之间。

### 2.2 数据分析与处理

#### (1)土壤侵蚀本底数据

三江源区特殊的地理、地质和气候环境条件,决定了其土壤侵蚀以冻融侵蚀为主、多种侵蚀交互作用的现状。本文以中国科学院资源环境科学数据中心 1995 年的 1:25 万土壤侵蚀数据为基础。该数据是全国第二次水土流失遥感调查的成果,以 1995-1996 年 TM 影像为主要信息源,并参考其他确定土壤侵蚀类型及其强度的相关资料及图件,结合野外调查建立解译标志,分析土壤侵蚀类型、坡度、植被覆盖度、地表组成物质等状况,利用同时期 1:10 万比例尺的土地利用图和地形图,土壤、地质、实测侵蚀和泥沙等资料,采用全数字作业的人机交互判读分析方法,经过综合分析而直接判定土壤侵蚀强度,生成分辨率为 1km 的 1995 年的土壤侵蚀空间分布图。土壤侵蚀分类依据中华人民共和国行业标准 SL 190-96“土壤侵蚀分类分级标准”的总体要求,根据外营力性质将土壤侵蚀分为水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀等主要类型,水蚀、风蚀强度分级依据一定的侵蚀影响因子数值对应的年土壤侵蚀模数范围分为 6 级。考虑到大部分地区暂时难以获取足够的侵蚀模数,因此,土壤侵蚀强度分级主要通过植被覆盖度、坡度、植被结构、地表组成物质、海拔高度、地貌类型等综合分析而实现。

水力侵蚀强度主要结合土地利用类型与坡度,非坡耕地分为轻度(5~8°)、中度(8~15°)、强度(15~25°)、极强度(25~35°)和剧烈(>35°),非耕地按林草覆盖度(<30%、30%~45%、45%~60%和 60%~75%)结合前述坡度范围划分侵蚀强度。风

力侵蚀强度的分级指标有地表形态(固定沙丘、半固定沙丘、沙地和滩地等)与植被覆盖度(30%~50%、50%~70%和>70%)。冻融侵蚀强度依据地表特征(冰川、常年积雪和高寒地区多年成片冻土区、高寒缓坡、草原灌木地区,植被与裸石间隔分布、高寒中、高山荒漠区,冰川和积雪分布较多,间或有裸石甚至有斑点状分布的植物、紧靠冰川或常年积雪区,高山冰川与湖泊相间,裸石与冰雪相间,局部裸石与融水水道并存)和侵蚀状况(几乎不发生侵蚀、融水较少,温差不大,侵蚀较少、融水较多,发生流水侵蚀,冰水对地表产生破坏、季节性侵蚀严重,局部有冰川泥石流)确定<sup>[20]</sup>。

(2)土地覆被与草地退化数据

20 世纪 70 年代中后期、90 年代初和 2004 年 3 期土地覆被遥感解译数据和两期草地退化类型图是以 3 期陆地卫星遥感影像为信息源,包括 20 世纪 70 年代末的 MSS、90 年代初的 TM 和 2004 年的 TM/ETM+,遥感数据的选择、可比性、图像处理精度详见文献[21]。利用 1:5 万/1:10 万地形图、1:100 万草地图、1:100 万植被图、DEM 等作为辅助数据,通过人工判读而产生土地覆被与草地退化数据。土地覆盖类型采用 Liu 等<sup>[22]</sup>人的分类方法,划分为 4 个一级地类、16 个二级地类。草地退化程度与等级划分以“天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标”(GB19377)为基础,并根据遥感影像判读原理和特点而制定细分的草地退化遥感分类系统和分级标准<sup>[21]</sup>。然后,通过对比分析 20 世纪 70 年代末、90 年代初期和 2004 年的 3 期解译结果,获得研究区草地退化格局和过程的空间数据。影像的获取时间以每年 6-9 月中旬为主,同时考虑获取

前同区域 7-10 天气象站点所记录的气象条件特别是降水量状况,以便提高不同时段影像间的可对比性和解译精度。同时,本研究分别于 2006 年 8 月、2007 年 7 月和 2008 年 7 月进行了 3 次野外草地生态调查,取得大量地面样点数据,据此对解译结果进行了地面验证。

(3)其他辅助数据

根据土地覆被遥感解译数据、草地类型图、20 世纪 70 年代中后期-90 年代初、90 年代初-2004 年的两期草地退化类型图,将三江源区的土壤侵蚀根据其发生的类型和程度划分为水力侵蚀、风力侵蚀、冻融+水力侵蚀和冻融+风力侵蚀四类 17 种(图 2),制作了三江源区 100×100m 栅格的土壤侵蚀复合类型分布图、20 世纪 70 年代中后期-90 年代初与 20 世纪 90 年代初-2004 年的两期草地生态系统土壤侵蚀变化状况分布图。其中,草地类型图通过融合 1:100 万草地分布图和 1:10 万土地覆被遥感解译数据而生成。各类数据转换为栅格数据后进行分析。并结合 DEM,分析研究区不同海拔高度、不同坡度和不同坡向土壤侵蚀的变化状况,进而分析了 70 年代末以来研究区土壤侵蚀的空间格局与过程特征。青藏高原 5 000m 以上地区以自然侵蚀为主,受人类活动的影响极小。因此,本研究基于数字高程模型(DEM)数据,提取海拔高度、坡度坡向等地形因素信息,将<5 000m 的冰缘地貌带和流水地貌带按 200m 间距划分海拔等级,坡度划分<3°、3~5°、5~15°、15~25°、25~35°、>35°等 6 个等级,坡向划分阴坡(北坡、东北坡和西北坡)、阳坡(包括南坡、东南坡和西南坡)和半阴半阳坡(东坡、西坡)3 个坡向。然后,基于三江源区的土壤

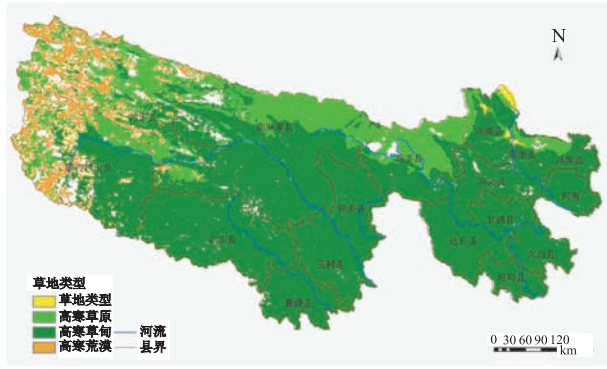


图 1 三江源区草地类型分布图

Fig. 1 Distribution of grassland types in Sanjiangyuan Region



图 2 三江源区 1995 年土壤侵蚀分布图

Fig. 2 Distribution of soil erosion types in 1995 in Sanjiangyuan Region

侵蚀复合类型分布图,结合两期草地退化类型空间分布图,用定性和定量相结合的方法分析评价了三江源区土壤侵蚀的空间差异,以及近30年来由于草地退化导致草地生态系统土壤侵蚀发生动态变化的状况。

2.3 土壤侵蚀分析方法

三江源区的草地退化格局在20世纪70年代之前已经形成,其后一直持续发生。退化过程的规律在不同区域和地带有明显不同的表现,在湿润半湿润的草甸类草地上,发生着草地破碎化先导,随后发生覆盖度持续降低,最后形成黑土滩的退化过程;而在干旱、半干旱的草原类草地上,发生着覆盖度持续降低,最后形成沙化、荒漠化的退化过程。源区高、中、低覆盖草地生态系统的面积变化在一定程度上反映出草地生态系统的退化趋势,退化的最终结果是高、中覆盖草地生态系统面积的减少、低覆盖草地生态系统面积的增加。20世纪70年代中后期-90年代初,三江源地区草地退化面积占全区草地面积的32.83%,而90年代初-2004年该比重上升为36.12%,前后两个时段对比草地退化面积增长了3.87%<sup>[21]</sup>。

已有研究表明,草地植被覆盖度降低会增加表土流失,加速土壤退化进程<sup>[23-24]</sup>。草地植被退化以后大面积的裸露或沙化,降低了土壤抗蚀性,导致

侵蚀加剧。李元寿等认为黄河源区高寒草甸覆被状况影响着坡面的侵蚀强度,高寒草甸植被覆盖度与土壤侵蚀强度呈显著的负相关关系,即高寒草甸退化程度越高,土壤侵蚀越强。退化较强的草甸区的平均侵蚀模数是退化较弱区的2.23倍<sup>[14]</sup>。王一博认为黄河源区高海拔区土壤均出现了不同的侵蚀过程,其中土壤表层的变化最明显,在山顶迎风坡面和植被严重退化的区域侵蚀较严重<sup>[15]</sup>。植被退化后表层土壤水分条件急剧下降,导致浅根性植被死亡、生物多样性降低<sup>[25]</sup>、鼠害猖獗、“黑土滩”范围扩大、草场退化及边坡失稳<sup>[26]</sup>,最终导致土壤侵蚀加剧,水源涵养效应降低。此外,源区地处青藏高原,年均降水量545mm,冻融变化异常剧烈,该区域植被一旦退化,冻融侵蚀叠加水蚀、风蚀,加剧了该区域的土壤侵蚀程度。

本研究根据已有研究的结论和三江源区的草地退化现象综合分析得到草地退化与草地生态系统土壤侵蚀状况的关系为(表1):单一类型的轻度草地退化如轻度破碎化、覆盖度轻度下降和轻度沼泽化草甸趋干化导致土壤侵蚀的微度加剧;轻度沙化/盐化退化和轻度破碎化、轻度覆盖度下降造成土壤侵蚀的轻度加剧;草地的六类中度退化导致土壤侵蚀的中度加剧;草地的九类中度和重度退化造成强度的土壤侵蚀加剧;而草地的重度破碎化、重度覆盖度下降退化导致土壤侵蚀的极强度加剧。

表1 草地退化与土壤侵蚀的关系  
Tab. 1 Relations among grassland degradation, soil conservation and soil erosion

草地退化类型	土壤侵蚀	草地退化类型	土壤侵蚀
轻度破碎化	微度加剧	轻度破碎化、重度覆盖度下降	强度加剧
中度破碎化	中度加剧	中度破碎化、轻度覆盖度下降	中度加剧
重度破碎化	强度加剧	中度破碎化、中度覆盖度下降	强度加剧
覆盖度轻度下降	微度加剧	中度破碎化、重度覆盖度下降	强度加剧
覆盖度中度下降	中度加剧	重度破碎化、轻度覆盖度下降	强度加剧
覆盖度重度下降	强度加剧	重度破碎化、中度覆盖度下降	强度加剧
轻度沙化/盐化退化	轻度加剧	重度破碎化、重度覆盖度下降	极强度加剧
中度沙化/盐化退化	中度加剧	轻度沼泽化草甸趋干化	微度加剧
重度沙化/盐化退化	强度加剧	中度沼泽化草甸趋干化	中度加剧
轻度破碎化、轻度覆盖度下降	轻度加剧	重度沼泽化草甸趋干化	强度加剧
轻度破碎化、中度覆盖度下降	中度加剧		

3 三江源区草地的土壤侵蚀时空分析

3.1 草地生态系统土壤侵蚀的空间差异

三江源区草地生态系统土壤侵蚀类型以冻融

+风力侵蚀和冻融+水力侵蚀为主(图2、图3),其中,冻融+水力侵蚀的面积为 $13.25\times10^6\text{ hm}^2$ ,占全区土壤侵蚀总面积的41.93%,侵蚀程度以微、轻度为主,主要分布在长江流域,以及黄河流域的南

部;冻融+风力侵蚀面积  $6.40\times10^6\text{ hm}^2$ , 占全区土壤侵蚀总面积的 20.48%, 以轻度为主, 主要分布在治多西部、唐古拉山乡中西部草地小范围轻度连续荒漠化区和黄河源区的北部。此外, 水力侵蚀面积  $4.31\times10^6\text{ hm}^2$ , 以微、轻度为主, 集中分布于东部的兴海、同德、泽库、河南, 以及称多南部、玉树、囊谦、杂多东部海拔 4 000 m 以下的高山河谷区, 这些地方人口集中, 农牧结合, 人为活动频繁, 耕地多为坡耕地, 土层薄, 水土保持能力差; 风力侵蚀面积  $6.88\times10^5\text{ hm}^2$ , 占全区土壤侵蚀总面积的 2.2%, 以极强度为主, 主要分布于源区西部和北部。

从源区各流域草地生态系统的土壤侵蚀状况看(图 4), 黄河流域的土壤侵蚀状况最为严重, 微度以上土壤侵蚀占整个流域面积的 73.15%; 侵蚀类型以冻融+水力侵蚀为主, 占流域土壤侵蚀总面积的 53.34%, 集中分布在流域的南部和东部; 水力侵蚀占侵蚀总面积的 30.23%, 主要分布在流域东部; 而冻融+风力侵蚀与风力侵蚀分别占流域侵蚀总面积的 13.88% 和 2.55%, 主要分布在黄河源头, 以及曲麻莱、玛多县内的黄河河流段以北的地区。长江流域, 微度以上土壤侵蚀占流域总面积的 37.57%; 以冻融+水力侵蚀为主, 占流域侵蚀总面积的 66.87%, 广布在整个流域内; 而冻融+风力侵蚀和风力侵蚀主要分布在流域北部的楚玛尔河与扎木曲流域, 分别占流域侵蚀总面积的 21.25% 和 3.83%。澜沧江流域, 微度以上土壤侵蚀占该流域总面积的 13.19%; 主要是冻融+水力侵蚀和水力侵蚀, 分别占流域侵蚀总面积的 56.97% 和 42.97%。

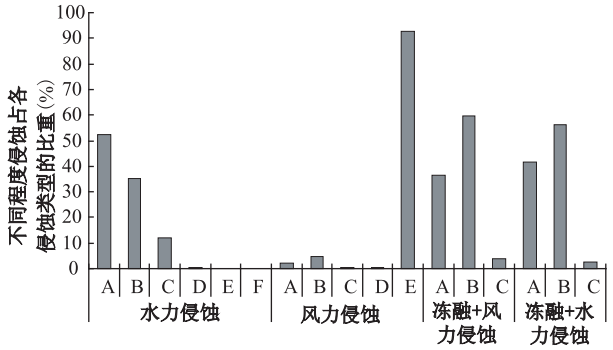


图 3 三江源区土壤侵蚀的类型与所占比重  
Fig. 3 Percentage of each soil erosion type in Sanjiangyuan Region

A 微度, B 轻度, C 中度, D 强度, E 极强度, F 剧烈  
从三江源区各县草地生态系统的土壤侵蚀状

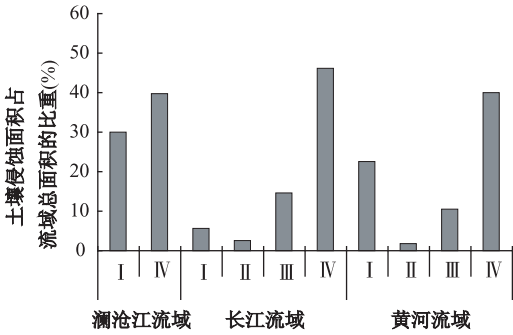


图 4 三江源区各流域的侵蚀类型与比重  
Fig. 4 Percentage of each soil erosion type for three river basins in Sanjiangyuan Region

I 水力侵蚀, II 风力侵蚀,  
III 冻融+风力侵蚀, IV 冻融+水力侵蚀

况看(图 5), 土壤侵蚀面积比重最少的是杂多县, 侵蚀面积占该县总面积的 69.7%, 侵蚀类型以冻融侵蚀+风力侵蚀为主, 占该县侵蚀总面积的 93.42%, 侵蚀程度以微度为主。土壤侵蚀面积比重最多的是河南县, 土壤侵蚀面积占该县总面积的 92.6%, 侵蚀类型以水力侵蚀为主, 占该县侵蚀总面积的 96.29%, 侵蚀程度以轻度侵蚀为主。

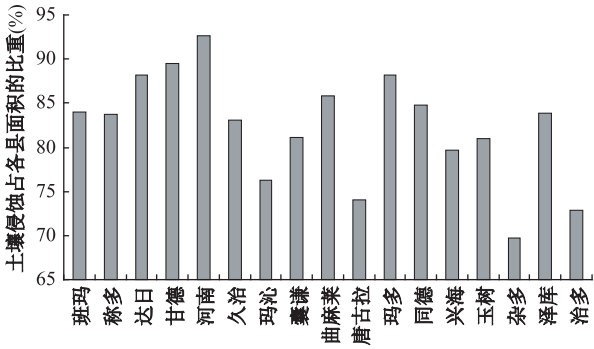


图 5 三江源区各县土壤侵蚀比重  
Fig. 5 Percentage of soil erosion in Sanjiangyuan Region (by county)

从三江源区各自然保护区草地生态系统的土壤侵蚀状况看(图 6), 阿尼玛卿自然保护区发生土壤侵蚀的面积比重最小, 侵蚀面积占该保护区总面积的 55.02%, 侵蚀类型以冻融+水力侵蚀为主, 占该保护区侵蚀总面积的 95.49%, 侵蚀程度以轻度为主。而土壤侵蚀最严重的是江西自然保护区和扎陵湖-鄂陵湖自然保护区, 其中, 江西保护区发生的土壤侵蚀占该区总面积的 93.91%, 侵蚀类型主要是水力侵蚀和冻融+水力侵蚀, 分别占该保护区侵蚀总面积的 80.32% 和 19.68%; 扎陵湖-鄂陵湖



自然保护区的土壤侵蚀占该保护区总面积的 90.09%，其中，冻融+风力侵蚀占保护区侵蚀面积的 41.45%，冻融+水力侵蚀占保护区侵蚀面积的 56.31%。

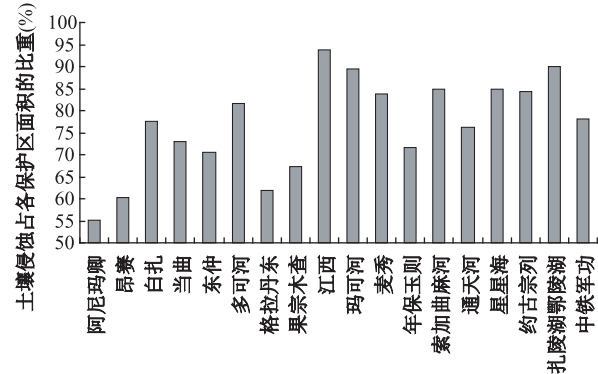


图 6 三江源区各自然保护区土壤侵蚀比重  
Fig. 6 Percentage of soil erosion for nature reserves in Sanjiangyuan Region

3.2 草地生态系统土壤侵蚀的地貌因素分析

受垂直地带性和区域地貌格局的影响，三江源

区的各类土壤侵蚀与海拔高度存在一定关系(图 7)。水力侵蚀主要发生在源区 3 200~4 600m 海拔范围内，侵蚀程度随着海拔范围的上升而呈现下降的趋势。风力侵蚀主要发生在西北部高原面海拔 2 800~3 600m 范围内，侵蚀程度随着海拔范围的上升而呈现增加的趋势。冻融+风力侵蚀与冻融+水力侵蚀主要发生在海拔 4 400m 以上的区域，侵蚀程度随着海拔范围的上升亦呈现增加的趋势。

从各类土壤侵蚀与坡度、坡向的关系图可知(图 8、图 9)，水力侵蚀主要发生在坡度为 5~25°的阴坡或阳坡，与坡向关系不大。侵蚀程度随着坡度范围的减小而呈现增加的趋势，强度水力侵蚀主要分布在<3°的阴坡，而极强度水力侵蚀则多处于<15°的阳坡。风力侵蚀主要发生在<3°的阴坡，侵蚀程度随着坡度范围的增大而呈现增加的趋势。冻融+风力侵蚀主要发生在<3°的区域，随着侵蚀程度的增加，侵蚀发生的坡向由阴坡为主变为阳坡为主。冻融+水力侵蚀则主要发生在<3°和 5~15°的阴坡。

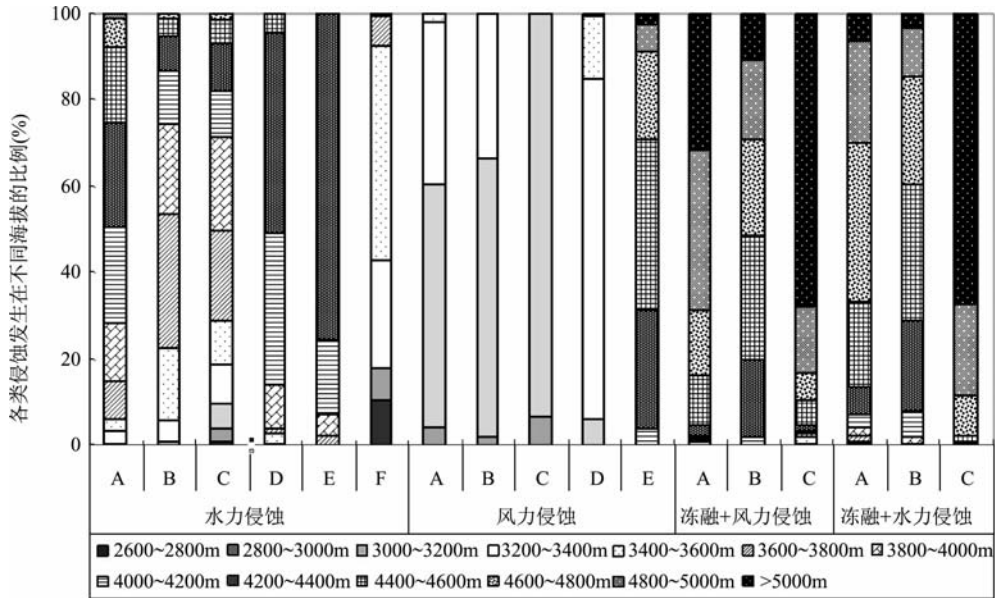


图 7 三江源区土壤侵蚀与海拔的关系  
Fig. 7 Percentage of soil erosion in different elevation zones in Sanjiangyuan Region

3.3 近 30 年来草地生态系统土壤侵蚀的动态分析

三江源区草地生态系统发生微度以上土壤侵蚀的比重最高，占该生态系统总面积的 56.04%。侵蚀类型以冻融+水力侵蚀为主，占草地生态系统土壤侵蚀面积的 61.25%，其次是冻融+风力侵蚀，

占草地生态系统土壤侵蚀面积的 21.37%。以三江源区近 30 年来草地生态系统的土壤侵蚀变化状况(图 10、图 12、表 2)可以得出:20 世纪 70 年代中后期-90 年代初、90 年代初-2004 年两个时段，三江源区草地生态系统土壤侵蚀加剧，发生微度以上土

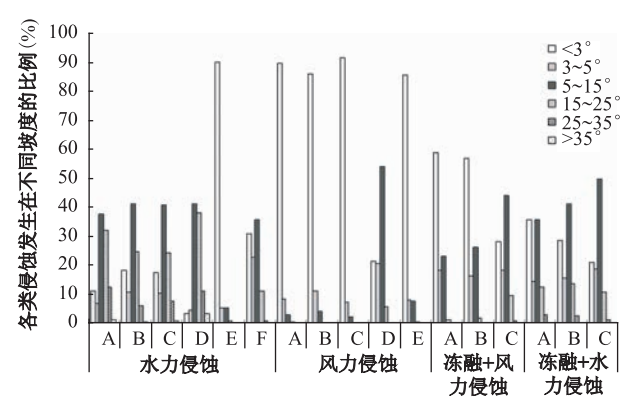


图 8 三江源区土壤侵蚀与坡度的关系

Fig. 8 Percentage of soil erosion in different slopes in Sanjiangyuan Region

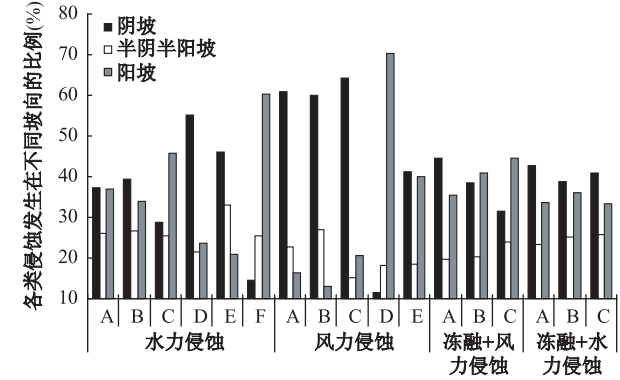


图 9 三江源区土壤侵蚀与坡向的关系

Fig. 9 Percentage of soil erosion in different aspects in Sanjiangyuan Region

壤侵蚀加剧的面积占源区草地生态系统面积的比例分别为 13.40%和 22.99%。从各土壤侵蚀类型的变化看,20 世纪 70 年代中后期到 90 年代初,草地生态系统中冻融+水力侵蚀加剧,加剧面积占源区侵蚀加剧面积的 61.58%,其中,微度和轻度加剧的面积分别占冻融+水力侵蚀加剧面积的 29.79%和 69.64%,主要分布于黄河源区的扎陵湖、鄂陵湖,曲麻莱南部与称多北部,以及达日;其次为冻融+风力侵蚀加剧,加剧面积占源区侵蚀加剧面积的 25.56%,其中,轻度侵蚀占该类型侵蚀加剧面积的 79.95%;水力侵蚀加剧和风力侵蚀加剧的比重较小,分别占源区侵蚀加剧面积的 11.3%和 1.55%,其中,微度、轻度和中度加剧的面积分别占水力侵蚀加剧面积的 60.17%、26.68%和 12.85%。从 20 世纪 90 年代初到 2004 年,草地生态系统中冻融+水力侵蚀加剧的面积占源区侵蚀加剧面积的 64.41%,其中,微度和轻度加剧的面积分别占冻融+水力侵蚀

加剧面积的 32.6%和 66.34%,主要位于黄河源区南部,零星分布于玛多南部、达日全县草地中等范围内轻度持续退化区、治多中东部、曲麻莱南端较大范围轻中度持续退化区,以及杂多中西部、唐古拉山乡东部草地中小范围轻度退化局部好转区;其次为冻融+风力侵蚀加剧,加剧面积占源区侵蚀加剧面积的 25.29%,以轻度为主,占冻融+风力侵蚀加剧面积的 87.42%,主要位于黄河源区北部;风力侵蚀加剧占源区侵蚀加剧面积的 1.56%,其中,极强度风力侵蚀加剧占风力侵蚀加剧面积的 91.76%;水力侵蚀加剧占水力侵蚀面积的 8.74%。

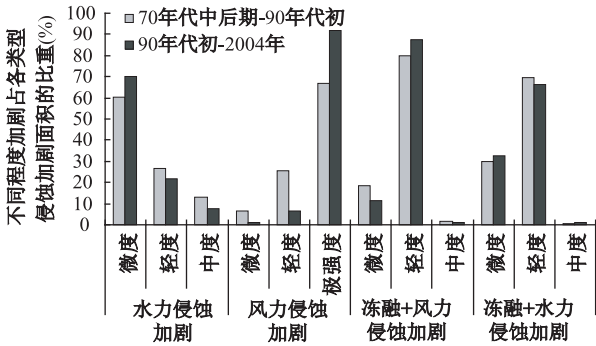


图 10 三江源区草地生态系统土壤侵蚀变化

Fig. 10 Soil erosion change in grassland in Sanjiangyuan Region

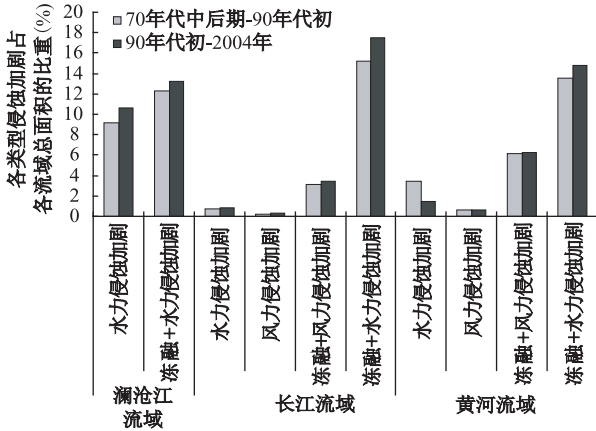


图 11 各流域草地生态系统的土壤侵蚀变化

Fig. 11 Soil erosion change in grassland ecosystems in three river basins

从 3 个流域在 20 世纪 70 年代中后期-90 年代初、90 年代初-2004 年两个时段的草地生态系统土壤侵蚀变化分析图(图 11)可以得出,前后两个时段相比,长江流域的草地生态系统土壤侵蚀加剧状况在后一时段远强于前一时段,加剧的微度以上土壤

侵蚀面积在前后两个时段分别占流域面积的12.86%和13.52%，加剧的侵蚀类型以冻融+水力侵蚀加剧为主；而黄河流域的草地生态系统土壤侵蚀加剧状况则是前一时段强于后一时段，加剧的微度以上土壤侵蚀面积在前后两个时段分别占流域

面积的22.59%和22.05%，加剧的侵蚀类型以冻融+水力侵蚀加剧和冻融+风力侵蚀加剧为主；澜沧江流域的微度以上土壤侵蚀加剧面积在前后两个时段分别占流域面积的3.63%和4.13%。

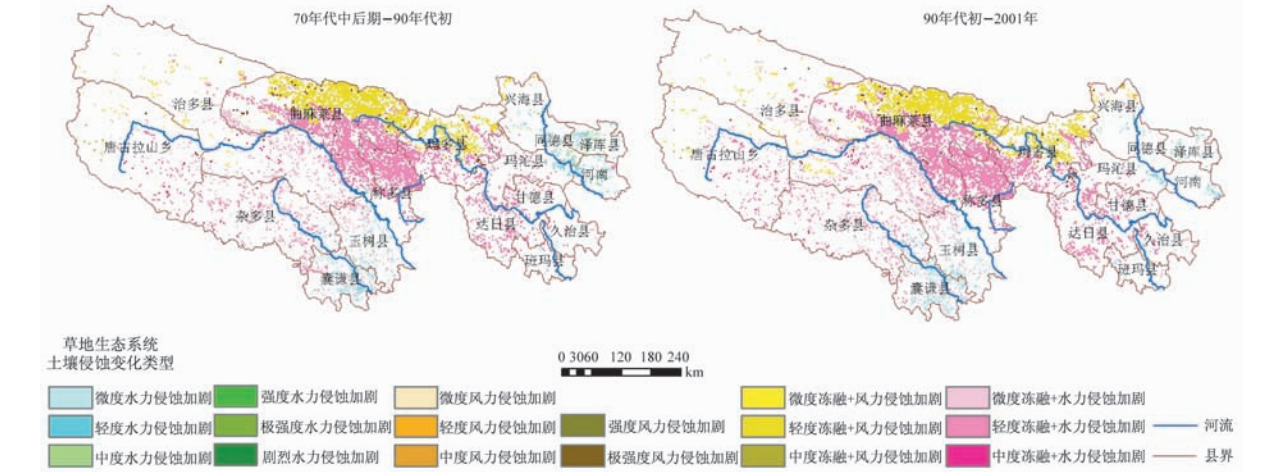


图 12 三江源区草地生态系统土壤侵蚀动态变化状况分布

Fig. 12 Spatial distribution of dynamic soil erosion in grassland in Sanjiangyuan Region

表 2 草地生态系统 70 年代中后期—90 年代初、  
90 年代初—2004 年土壤侵蚀动态变化

土壤侵蚀变化类型	70 年代中后期- 90 年代初		90 年代初- 2004 年	
	面积(10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup> )	所占比例(%)	面积(10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup> )	所占比例(%)
水力侵蚀加剧	0.80	11.30	0.67	8.74
风力侵蚀加剧	0.11	1.55	0.12	1.56
冻融+风力侵蚀加剧	1.81	25.56	1.94	25.29
冻融+水力侵蚀加剧	4.36	61.58	4.94	64.41
合计	7.08	100	7.67	100

#### 4 结论与讨论

三江源区土壤侵蚀是以冻融侵蚀伴随着水力或风力侵蚀的复合侵蚀类型为主，分别占源区土壤侵蚀总面积的41.93%和20.48%，侵蚀程度以轻度为主。前者主要分布在源区南部水热条件较好的区域，后者主要分布于源区北部的荒漠化草原地区。通过本研究得出，源区草地生态系统发生微度以上土壤侵蚀的比例达56.04%，其中，黄河源区草地生态系统的土壤侵蚀状况最为严重，微度以上土壤侵蚀面积占青海省内黄河流域面积的73.15%，澜沧江流域发生微度以上土壤侵蚀的面积占青海省内澜沧江流域总面积的13.19%，长江流域微度

以上土壤侵蚀面积占青海省内长江流域面积的37.57%。源区土壤侵蚀受垂直地带性和区域地貌格局的影响，水力侵蚀、风力侵蚀、冻融复合型侵蚀分别主要发生在3200~4600m、2800~3600m和4400m以上的海拔范围内以及5~25°、<3°与5~15°的坡度范围内，与坡向关系不大。随着海拔范围的上升，风力侵蚀和冻融复合型侵蚀程度呈增加趋势，而水力侵蚀程度呈下降趋势。

本文分析认为，不同程度的草地退化会导致土壤侵蚀发生不同程度的加剧。结果表明，在20世纪70年代中后期-90年代初、90年代初-2004年两个时段内，三江源区发生微度以上土壤侵蚀加剧的草地生态系统分别占该生态系统面积的13.40%



和 22.99%，说明 90 年代以来，源区的土壤侵蚀状况在前期加剧的情况下更加恶化。其中，长江流域和澜沧江流域的土壤侵蚀状况在持续恶化，而黄河流域的土壤侵蚀状况略有好转。自然因素如地质、地貌和气候条件是土壤侵蚀发生的基础和决定因素，而人类活动是土壤侵蚀加剧的非自然驱动因素，气候暖干化导致的多年冻土退化和长期超载过牧导致的草地生态系统退化是造成三江源区草地生态系统土壤侵蚀加剧的主要因素。

本文仅从遥感调查的定性角度初步探讨了自 20 世纪 70 年代以来三江源区土壤侵蚀的空间差异和时间变化，然而许多内容有待进一步深入研究。首先，地面验证和定点量化分析，下一步需要进行野外实验分析，特别是<sup>137</sup>Cs 等核示踪研究技术的应用，大量收集该区域地面土壤、水土保持和水文等方面的历史与现有资料，以便与本文结果进行相互验证。然后，土壤侵蚀与草地退化关系的区域研究，本文根据已有研究资料和理论知识定性分析草地生态系统的土壤侵蚀与草地退化之间的关系，然而，不同区域的草地生态系统与土壤侵蚀具有不同的关系，如何进行区域的定量关系研究将是未来研究的重点。其次，驱动因素的研究中，应加强对降雨、植被等空间分布差异的研究，进一步细化降雨侵蚀力和植被变化过程的描述方法，并深入研究它们之间的关系对土壤侵蚀带来的影响。

## 参考文献:

- [1] 关君蔚. 水土保持原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996, 2-3.
- [2] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 3-5.
- [3] 齐永青. 小流域侵蚀泥沙的<sup>137</sup>Cs 法研究——以三峡库区开县春秋小流域为例[D]. 博士学位论文, 2006, 2-5.
- [4] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.
- [5] 赵士洞, 张永民. 生态系统评估的概念、内涵及挑战——介绍“生态系统与人类福利: 评估框架”[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 650-657.
- [6] 符素华, 刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 78-84.
- [7] 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(3): 242-251.
- [8] 吴礼福. 黄土高原土壤侵蚀模型及其应用[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 29-35.
- [9] 颀耀文, 陈怀录, 徐克斌. 数字遥感影像判读法在土壤侵蚀调查中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(2): 157-162.
- [10] 李锐, 杨勤科, 赵水安, 等. 现代空间信息技术在中国水土保持中的应用[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 1-5.
- [11] 张信宝, 李少龙, 王成华, 等. 黄土高原小流域泥砂来源的<sup>137</sup>Cs 法研究[J]. 科学通报, 1989, 43(3): 210-213.
- [12] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 干草原地区土壤<sup>137</sup>Cs 沉积特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 221-225.
- [13] 严平, 董光荣, 张信宝, 等. <sup>137</sup>Cs 法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果[J]. 科学通报, 2000, 45(2): 199-204.
- [14] 李元寿, 王根绪, 王军德, 等. <sup>137</sup>Cs 示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 114-121.
- [15] 王一博. 江河源区冷生土壤环境对高寒生态系统变化的响应与环境效应研究[D]. 博士学位论文, 2007.
- [16] 吴秀芹, 蔡运龙. 土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 576-584.
- [17] 程国栋. 关于江河源区生态环境保护与建设研究的几点认识[J]. 地球科学进展, 1998, 13(增刊): 1-5.
- [18] 王根绪, 丁永建, 王建, 等. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 163-173.
- [19] 封建民, 王涛, 谢昌卫, 等. 黄河源区生态系统环境退化研究[J]. 地理科学进展, 2004, 23(6): 56-62.
- [20] 赵晓丽, 张增祥, 周全斌, 等. 中国土壤侵蚀现状及综合防治对策研究[J]. 水土保持学报, 2006, 16(1): 40-46.
- [21] Liu Jiyuan, Xu Xingliang, Shao Quanzin. Grassland Degradation in the “Three-River Headwaters” Region, Qinghai Province [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 259-273.
- [22] Liu Jiyuan, Zhuang Dafang, Luo Di, et al. Land-cover Classification of China: Integrated Analysis of AVHRR Imagery and Geo-physical Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(12): 2485-2500.
- [23] Lai R. Soil Erosion and Land Degradation: The Global Risks[J]. Advances in Soil Sciences, 1990, 11: 169-172.
- [24] Zhang L, Dawas W R, Reece P H. Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Change at Catchment Scale[J]. Water Resource Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [25] 王秀红. 青藏高原高寒草甸层带[J]. 山地研究,

1997, 15(2): 67-72. 态环境的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 667-671.  
[26] 彭轩明,吴青柏,田明中. 黄河源区地下水位下降对生

**Spatial-temporal Analysis of Soil Erosion in Grassland over the Past Three Decades in Sanjiangyuan Region, Qinghai Province, China**

HUANG Lin, SHAO Quankin, LIU Jiuyan

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CA S, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Sanjiangyuan Region, as the headwaters of the Yellow River, Yangtze River and Lancang River, is known as China’s Water Tower. In recent several decades, continuously grassland ecosystem degradation and soil erosion in the region were increasingly serious due to natural and human activities such as global warming, overgrazing, mining etc. Currently, the degradation of grassland ecosystem has attracted attention worldwide. Therefore, the spatial and temporal patterns of soil erosion in the region were beneficial to provide scientific foundation for ecological protection and construction. This study aims to analysis the relation between grassland degradation and soil erosion, and spatial variations and dynamic of grassland soil erosion in the region since 1970s, according to remote sensing interpretation of soil erosion, land use and grassland degradation information. This paper analyzed spatial difference of soil erosion and its dynamic status over the past 30 years in grassland ecosystem in Sanjiangyuan Region, Qinghai Province. The results showed that the proportion of soil erosion in this region account for 46.74%, and 56.04% in the grassland. The primary types of soil erosion in Sanjiangyuan Region are composition of freeze-thaw and wind or freeze-thaw and water erosion, about 41.93% and 20.48% of total erosion area respectively, and most of the erosion degree is slight. The distribution altitude range were 3200~4600m, 2800~3600m and more than 4400m, and the slope range were 5~25°, less than 3° and 5~15° for water erosion, wind erosion and composition freeze-thaw erosion respectively. The erosion degree of wind erosion and composition freeze-thaw erosion increased with elevation rising, and decreased for water erosion. Soil erosion from the beginning of 1990s to 2004 showed more enormous degradation than the former period, and the warming climate and grassland degradation resulted overloading and overgrazing were the main driving forces.

**Key words:** Sanjiangyuan Region; grassland ecosystems; soil erosion