

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.108

引用格式: 朱刚, 高会军. 三江源区冻融荒漠化遥感分析[J]. 中国地质调查, 2025, 12(3): 57–65. (Zhu G, Gao H J. Remote sensing analysis of freeze–thaw desertification in Sanjiangyuan region[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3): 57–65.)

三江源区冻融荒漠化遥感分析

朱刚, 高会军

(中国煤炭地质总局航测遥感局, 陕西 西安 710199)

摘要: 冻融荒漠化的快速发展对青藏高原的生态安全构成了严重挑战, 为提升冻融荒漠化的研究水平, 推动冻融荒漠化的科学防治, 以三江源区的冻融荒漠化为研究对象, 构建基于地学特征的冻融荒漠化遥感信息提取方法, 并应用该方法对三江源区的冻融荒漠化进行遥感调查, 分析研究区冻融荒漠化的分布特征、成因与发展趋势。研究结果显示: 永久性冻土分布地区在不同地理位置形成的冻土地貌类型是冻融荒漠化的判读依据, 综合评价地表裸露与破碎面积占比、植被覆盖度、地表景观特征等指标, 将冻融荒漠化分为重度、中度、轻度3个级别; 构建研究区不同程度冻融荒漠化的遥感解译标志, 获取的三江源区冻融荒漠化解译数据准确率达80%以上; 研究区冻融荒漠化以重度为主, 长江源区是三江源区冻融荒漠化分布面积最大的区域; 多年冻土是冻融荒漠化发生的物质条件, 区域性气候持续变暖是冻融荒漠化问题加剧的内在原因, 过度放牧、草地超载是造成冻融荒漠化快速发展的主要人类活动影响因素; 由于青藏高原气候的暖湿化趋势, 永久性冻土的持续退化将造成冻融荒漠化进一步加剧。研究表明遥感调查方法能够快速实现对冻融荒漠化信息的快速获取, 具有一定的借鉴意义。

关键词: 三江源区; 冻融荒漠化; 遥感; 分布特征; 成因; 发展趋势

中图分类号: P954

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2025)03–0057–09

0 引言

冻融荒漠化是我国分布面积第二大的荒漠化类型^[1], 主要分布于青藏高原地区, 三江源区是青藏高原冻融荒漠化分布面积最大、程度最严重的地区。随着全球气候日益变暖, 加之人类活动的影响, 近年来三江源区的冻融荒漠化发展迅速, 同时与水土流失、土地沙化并存, 对草原、森林、湿地等生态系统结构的稳定构成了重大挑战, 严重影响了青藏高原的生态安全^[2–5]。因此, 加强冻融荒漠化的研究工作对开展青藏高原生态保护具有重要意义。

目前, 冻融的相关研究主要集中于冻融侵蚀、冻土退化等领域^[1–16], 关于冻融荒漠化的研究较少。通常认为冻融荒漠化是指在昼夜或季节温差较大的地区, 在气候变异和/或人为活动的影响下, 岩体或土壤由于剧烈的热胀冷缩而出现结构破坏或质量下降, 形成植被衰退、土壤退化、地表裸露化

或破碎化的土地退化过程^[17]。李森等^[4]提出冻融荒漠化是在气候变异或人为活动等因素的作用下, 高海拔地区多年冻土发生退化, 季节融化层增厚, 冻土厚度减薄或冻土岛消融, 使地表岩土体的冻融过程或斜坡过程受到强化, 形成以融沉为主要标志的裸露化、破碎化土地的过程, 该过程的实质是土地退化, 而冻融荒漠化程度的分级标准建立在生态基准面的基础上, 选用冻融地貌形态及其占地百分比、植被覆盖度等代表性因子作为分级指标。上述两种冻融荒漠化的定义均强调了冻融荒漠化的实质是高海拔冻土地区在气候变异或人类影响下发生土地生物生产量的降低, 指出冻融作用的结果是土地退化。《全国荒漠化和沙化监测技术规定》^[18]中关于冻融荒漠化程度分级的思路是首先按照地貌类型将永久性冻土的所有分布区域均作为冻融荒漠化的分布地区, 再按照海拔高度、地貌类型、植被覆盖度进行不同程度类型的划分。相比较而言,

李森等^[4]提出的分级标准将冻土地貌景观特征、冻融作用损毁地表所占比例结合起来,突出了气候变异和人类活动对冻土地地区地貌景观的干扰程度,更具科学性与可操作性。

鉴于冻融荒漠化主要分布于高寒无人区,遥感技术是获取空间分布与变化信息的最佳手段。因此,本文结合具体工作实践,以三江源区为研究对象,在构建冻融荒漠化的遥感调查方法的基础上,对冻融荒漠化的分布特征进行信息提取,并分析其成因和发展趋势,旨在为开展冻融荒漠化研究工作提供借鉴,科学推进冻融荒漠化的防治。

1 研究区概况

研究区位于青海省南部,是长江、黄河和澜沧江的源头地区,总面积约 30 万 km²(图 1)。地貌类型以高山、河谷丘陵为主,主要有昆仑山主脉及其支脉可可西里山、巴颜喀拉山等,平均海拔 4 000 m 以上。中西部和北部为河谷丘陵,地形开阔平坦,

因冻土广泛发育、排水不畅,形成了大面积以冻胀丘为基底的高寒草甸和沼泽湿地;东南部以高山峡谷为主,河流切割强烈,山体相对高差多在 500 m 以上。水系发育,主要河流有沱沱河、通天河、当曲河、楚玛尔河等,湖泊主要有扎陵湖、鄂陵湖等。冰川分布面积大,多为大陆性山地冰川,覆盖面积约 2 400 km²,资源蕴藏量达 2 000 亿 m³。研究区为高原大陆性气候,年均降水量为 457.8 mm,年均气温为 1.0 ℃,1961—2020 年的 60 a 间呈降水量增多、气温升高的趋势,降水量变化率为 1.03 mm/a,升温率为 0.038 ℃/a^[19]。土壤具有典型的垂直地带性分布特征,随着海拔由高到低,土壤类型依次为高山寒漠土、高山草甸土、高山草原土、山地草甸土,其中以高山草甸土为主,土壤发育仍处于新的成土过程中,具有成土层薄、层次简单、粗骨性强、风化程度低、水分不足、抗蚀能力弱的特点,植被以高寒草原和高寒草甸为主。牧业是研究区的支柱产业,工程建设活动较少,早期的工程活动主要为青藏铁路与公路建设。

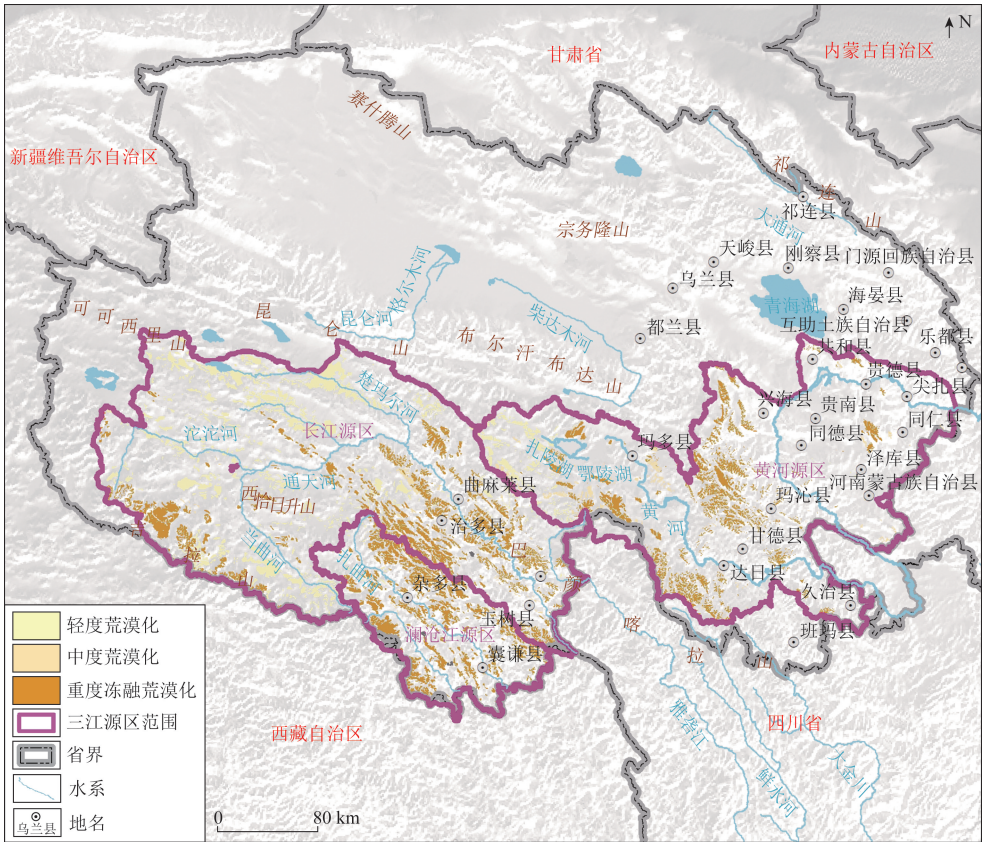


图 1 研究区冻融荒漠化分布图

Fig. 1 Distribution map of freeze – thaw desertification in the study area

2 研究方法

2.1 研究思路

冻融荒漠化的微地貌特征、地表物质组成、植被条件与地表景观破碎程度等地学特征在遥感影像上有着直观反映,通过综合分析,可获取冻融荒漠化的空间分布与程度信息。研究思路如下:首先,根据调查比例尺选择合适的卫星数据源,由于冻融荒漠化图斑是综合性图斑,如果解译比例尺过大,易将图斑中的植被覆盖区域与裸露区域分离,仅留下裸露图斑,难以反映不同程度冻融荒漠化的分布特征,建议解译的适宜比例尺为 1:5 万~1:10 万,数据的时相应选择在植被的生长期;其次,依据冻土地貌类型和地表覆被特征建立遥感解译标志;再次,根据室内遥感解译结果进行野外调查与验证;最后,进行初步解译成果修改与数据统计。

2.2 卫星数据源

卫星数据的空间分辨率是数据源选择的重要因素之一。对于 1:10 万精度的遥感解译工作,可采用 Landsat-8 卫星数据,全色波段融合处理后的数据空间分辨率为 15 m;对于 1:5 万及以上精度的遥感解译工作,建议采用空间分辨率优于 2 m 的国产高分系列卫星数据(如高分 1 号、2 号等)。卫星数据时相选择在 6—9 月之间,在该时间段高海拔地区的气温最高,地表冻结层融解,造成的土层裸露、景观破碎现象易于识别,同时该时间段植被茂盛,有利于对植被的破坏情况进行判断。本文采用的卫星数据是 2022 年 7 月 12 日的 Landsat-8 数据,空间分辨率为 15 m,满足 1:10 万精度解译要求。

应用 Erdas 软件对卫星数据进行处理,处理的流程包括几何校正、波段融合与色彩增强等。采用地形图选取控制点的方法对图像进行几何校正,校正后精度控制在 1 个像元之内。为真实反映地物光谱信息并提高遥感图像的空间分辨率,波段融合采用 4、3、2+8 波段的真色彩合成方案。融合完成后,为突出地表冻融荒漠化信息,采用去相关分析、主成分分析、差别化拉伸等方法对遥感图像进行增强处理,处理后的图像能够有效降低不同波段之间的相关性,增大不同地物信息之间的反差。

其他资料包括第四纪地质图、土地利用图等图件及冻土分布、气象、植被、经济社会等资料。

2.3 冻融荒漠化程度分级及遥感解译标志

首先,将冻土地区是否分布有岩屑坡、热融滑塌、冻融蠕移、热融湖塘、热融塌陷等地貌类型作为冻融荒漠化的判断依据(图 2),重点分析上述地貌类型是否由气候变异和人类活动造成;其次,评价土地的退化程度,将地表景观特征、土地裸露与破碎面积占比、植被覆盖度等作为主要指标进行程度分级,分为重度、中度、轻度 3 种^[4,15](表 1)。各冻融地貌类型的遥感解译标志如下:冻融蠕移呈棕黄色,具绿色斑点状影纹,呈不规则条带状、片状分布于缓坡丘陵下部;热融滑塌呈紫红色、粉红色,具绿色斑点状影纹,呈不规则斑片状分布于缓坡丘陵、山前冲洪积扇下部;岩屑坡呈灰色、棕色,色彩较均匀,局部由于积雪呈高亮白色,呈不规则条带状分布于山脊线附近及山地斜坡地区,山体底部岩屑堆积呈扇体休止堆积;热融湖塘呈浅棕色、浅绿色,具黑色、深蓝色斑点状影纹,呈不规则斑片状分布于地形平缓的河谷、湖盆周边地区。

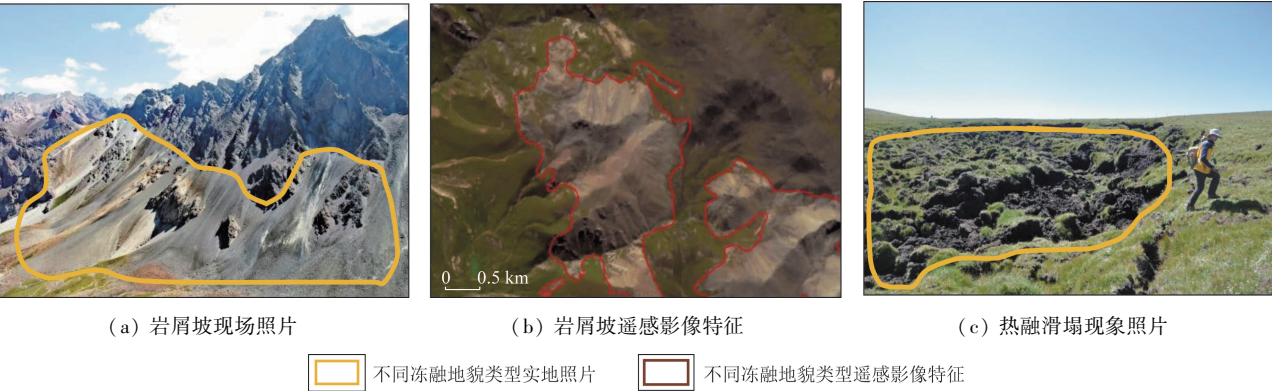


图 2-1 不同冻土地貌实地照片及遥感影像特征

Fig. 2-1 Field photos and remote sensing image characteristics of different permafrost landforms

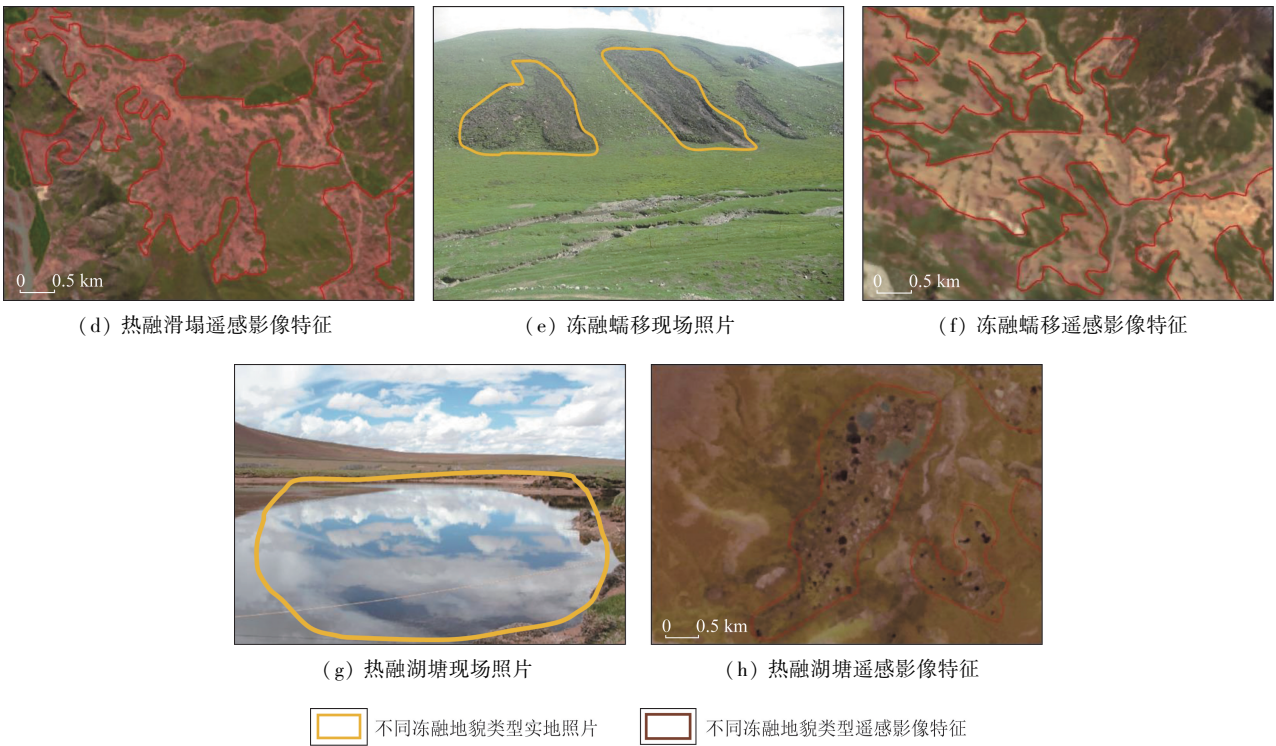


图 2-2 不同冻土地貌实地照片及遥感影像特征

Fig. 2-2 Field photos and remote sensing image characteristics of different permafrost landforms

表 1 冻融荒漠化程度分级及遥感解译标志

Tab.1 Degree classification and remote sensing interpretation marks of freeze – thaw desertification

程度	地表景观特征	土地裸露与破碎面积占比/%	植被覆盖度/%	遥感解译标志	遥感影像特征
重度	地表出现片状裸地及强烈的热融塌陷、热融滑塌、冻融侵蚀劣地，或雪线附近的岩屑坡、冻融泻溜土坎和裸露坡面等	> 50	< 10	呈紫红色、棕灰色、灰色，局部由于积雪、冰川分布，呈黑色、白色斑片影纹，色彩较均匀，主要分布于山脊两侧，可解译程度高	见图 2 (b)
中度	地表出现热融滑塌或形成碎石斑、片状流沙、冻融泻溜土坎和裸露坡面等	[10, 50]	[10, 30]	呈紫红色、粉红色，具绿色、棕色斑点状影纹，不规则条带状分布，主要分布于山体中下部的坡面，可解译程度高	见图 2 (d) 、图 2 (f)
轻度	地表出现热融湖塘或形成冻融泻溜土坎、草皮土坎等	< 10	> 30	呈浅紫红色，具绿色或蓝色斑点状影纹，不规则斑片状分布于低缓的河谷丘陵或河流、湖盆周边地区，可解译程度高。	见图 2 (h)

2.4 冻融荒漠化信息提取

根据建立的遥感解译标志,在 ArcGIS 软件中采用人机交互式解译的方法对不同程度的冻融荒漠化信息进行提取,信息提取精度为 1:10 万,即单个图斑实地解译面积不小于 4 万 m²。

信息提取工作完成后进行野外调查与验证,调查的内容包括:冻融荒漠化分布的地形地貌特征,即山地斜坡、缓坡丘陵、河谷、山前冲洪积扇等;冻融荒漠化所在区域的下垫面物质类型,即残坡积物、冲洪积物、冲湖积物、湖积物等;通过观察地表

裸露情况与植被破坏程度来判断冻融荒漠化的规模与危害程度。验证的内容包括:对冻融荒漠化定性与程度判断的准确性及图斑勾绘范围的精确性,验证时应注意河谷地区分布的热融湖塘,判断是否造成了生物生产量降低,如果造成了地表土壤层或植被破坏,可认定为冻融荒漠化,反之不作为冻融荒漠化处理。

根据野外调查与验证的结果,对存在问题与疑义的图斑进行修正,最终形成研究区冻融荒漠化解译成果和相关统计数据。

3 结果

3.1 冻融荒漠化分布特征

研究区冻融荒漠化分布情况见图1。根据遥感解译结果,冻融荒漠化面积为41 823.26 km²。其中,长江源区冻融荒漠化面积为22 098.11 km²,主要分布于山前冲洪积平原、山间盆地及湖盆周边;澜沧江源区冻融荒漠化面积为8 826.42 km²,主要分布于扎曲河沿岸;黄河源区冻融荒漠化面积为10 898.73 km²,主要分布于巴颜喀拉山东北部的山前冲洪积平原和山间盆地,以及鄂陵湖、扎零湖的湖盆周边地区。

轻度冻融荒漠化遥感解译面积为13 299.40 km²,占研究区冻融荒漠化总面积的31.80%,典型影像特征见图3(a),以热融湖塘、冻融蠕移及少量的热融滑塌为主。以热融湖塘为主的轻度区域主要分布于河谷、山前冲洪积扇以及湖盆周边地区,地表由规模较小、呈不规则形态的密集水体组成,对原地表的生物生产力造成了一定的破坏;以冻融蠕移、热融滑塌为主的轻度区域主要

分布于缓坡丘陵的下部,对原始地貌已经造成了破坏,而中上部未发生破坏的区域植被较完整。

中度冻融荒漠化遥感解译面积为1 831.50 km²,占研究区冻融荒漠化总面积的4.38%,典型影像特征见图3(b),以热融滑塌、冻融蠕移、热融湖塘为主。主要分布于地势高差不大、坡度较缓的山地斜坡与丘陵地区,局部有少量植被分布。以热融湖塘为主的中度冻融荒漠化主要分布于地形平缓的湖盆、河谷周边地区,分布区域内植被覆盖度较低,水体周边植被破坏严重;以热融滑塌、冻融蠕移为主的中度冻融荒漠化主要分布于山前冲洪积扇及缓坡丘陵地区,造成了一定的植被破坏。

重度冻融荒漠化遥感解译面积为26 692.36 km²,占研究区冻融荒漠化总面积的63.82%,典型影像特征见图3(c),以岩屑坡、热融滑塌与冻融蠕移为主。不同冻土地貌类型形成的重度冻融荒漠化分布位置有明显差异,以岩屑坡为主的重度冻融荒漠化主要分布于山脊线两侧、雪线附近,而以热融滑塌为主的重度冻融荒漠化主要分布于山地斜坡地区,地表景观破碎、裸露严重。



(a) 曲麻莱县境内长江南岸(轻度)

(b) 治多县境内长江西岸(中度)

(c) 治多县境内长江西岸(重度)

图3 不同程度冻融荒漠化典型遥感影像

Fig.3 Typical remote sensing images of freeze - thaw desertification with different degrees

3.2 冻融荒漠化成因

冻融荒漠化的发生是地表物质、冻融作用、气候变化与人类活动等多种因素共同作用的结果。通过遥感技术获取冻融荒漠化的空间分布特征,结合第四纪地质与地貌、气象监测数据、经济社会等资料,对研究区冻融荒漠化的成因进行分析。

多年冻土是冻融荒漠化发生的物质条件,其主要由第四系冲积物、冲洪积物、湖积物及残坡积物组成,不同沉积物类型及分布地理位置在遥感影像上有着清晰的反映。从分布区域上来看:第四系冲积物、冲洪积物、湖积物主要分布于地形平缓的

河谷、湖盆周边及山前冲洪积扇的前缘地区,形成的冻融地貌类型主要有热融湖塘、冻融蠕移、热融滑塌等;残坡积物主要分布于山地斜坡地区,形成的冻融地貌类型主要有岩屑坡与热融滑塌。三江源区冻土的地表植被一般稀疏低矮,多为垫状植物,单株个体矮小,生长期短,难以对冻土形成有效的保护,一旦植被遭到破坏,植被生长与冻土水热过程的平衡关系受到干扰,不仅会使地表侵蚀容忍量骤降,而且会使冻土结构受到影响甚至退化,成为冻融荒漠化发生的物质条件^[4]。

冻融作用是冻融荒漠化发生的动力条件。根

据遥感解译标志,通过识别不同地貌单元下的冻融地貌类型,能够判别冻融作用的类型。研究区的冻融作用包括寒冻风化剥蚀作用、冻融滑移作用、冻胀-融沉作用等,不同地貌单元在不同冻融作用下分别形成山地寒冻风化剥蚀-岩屑坡、山坡冻融滑移带-热融滑塌、山前倾斜平原及河谷平原冻胀-融沉带-热融湖塘、冻融蠕移等。

区域气候持续变暖导致冻土层变薄是冻融荒漠化加剧的内在成因。据青藏高原第二次科考首期成果,1951—2018年,青藏高原气温增速达 $0.038\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,20世纪70年代以来,冻土面积由150万 km^2 缩减至126万 km^2 ,20世纪90年代以来,永久冻土区的活动层每年增加7.5 cm。多年冻土作为广泛分布的弱透水层,对研究区高寒植被的活动层水分和养分保持起着关键作用,气温的持续变暖和多年冻土的明显退化导致植物生境发生变化,使植被群落结构由沼泽化草甸向草原化草甸转变,因此,即使没有人类活动的扰动,多年冻土退化在一定程度上已经引起了草地的变化,尽管目前物种未发生明显变化,但已经引起了植被覆盖度的降低^[20-23]。

过度放牧、草地超载是造成冻融荒漠化快速发展的主要人类活动影响因素。由于研究区地处高寒地区,农业耕作活动分布较少,牧业活动是当地的主要经济活动方式,牧业活动的快速发展导致过度放牧、草地超载等问题较为突出。根据相关统计数据,仅在2014年,三江源区理论载畜量为926.63万羊单位,而实际载畜量为1 828.84万羊单位,超载近100%^[24],尽管在2005—2017年先后实施了三江源生态保护和建设的一期和二期工程,但载畜压力指数仍由1.38增至1.60^[25],草地超载加剧了草地退化问题,破坏了冻土层的平衡状态,使多年冻土上限处形成热量积累,造成冻土消失或上限下降,导致表层土壤水分含量降低、植被退化,在强风作用下极易形成冻融荒漠化土地^[26-28]。

3.3 冻融荒漠化发展趋势

由于三江源区冻融荒漠化主要分布于海拔4 000 m以上的无人区,除在河谷地区及地形较为平缓的斜坡地段,人类活动对冻融荒漠化的发生有一定的影响外,多数冻融荒漠化的发展与气候变化有密切关系。随着青藏高原气候的暖湿化趋势持续加剧^[21],冻土层将进一步变薄,冻融荒漠化有逐步加强的趋势。更重要的是,冻融荒漠化在河谷与湖盆周边地区多与沙质荒漠化共生,反复的冻融风

化和冻融交替作用为沙质荒漠化的发展提供了更多的沙源物质,在冻融荒漠化加剧的同时,也将引起沙质荒漠化的快速发展。因此,为保障研究区的生态安全,建议采用遥感技术对冻融荒漠化以及与之相关的环境变化进行持续监测,以提升冻融荒漠化发展趋势预测的科学性。

4 讨论

本文建立了三江源区不同程度冻融荒漠化的遥感解译标志并进行了信息提取,随机选取图斑进行了野外验证,验证结果表明冻融荒漠化的定性准确率较高,可达80%以上,存在的问题主要有解译遗漏和图斑边界勾绘不精确,表明通过分析地表物质组成、地形地貌、植被条件与地表景观破碎程度等要素进行冻融荒漠化遥感解译的思路是基本可行的,后期通过提升解译人员的专业技术能力并采用多期、多源卫星数据对比分析可提高解译精度。

冻融荒漠化作为青藏高原特有的荒漠化类型,研究其分布特征与成因关系到对青藏高原生态屏障的保护和修复,遥感技术作为信息获取的有效技术手段可进一步提升冻融荒漠化的研究水平。

5 结论

(1)构建了基于地学基础的冻融荒漠化遥感信息提取方法,建立了三江源冻融荒漠化的遥感解译标志并进行了遥感解译,野外验证结果揭示冻融荒漠化的解译准确率可达80%以上,表明该方法能够支撑1:10万的冻融荒漠化遥感调查工作。

(2)根据遥感调查结果,三江源区的冻融荒漠化面积为41 823.26 km^2 。长江源区冻融荒漠化面积最大,为22 098.11 km^2 ,占三江源区冻融荒漠化面积的52.84%,黄河与澜沧江源区分别占26.06%与21.1%;冻融荒漠化以重度为主,面积为26 692.36 km^2 ,占三江源区冻融荒漠化总面积的63.82%,轻度与中度冻融荒漠化面积分别占31.80%与4.38%。

(3)冻融荒漠化的发生是地表物质、冻融作用、气候变化与人类活动等多种因素共同作用的结果。多年冻土是冻融荒漠化发生的物质条件,区域性气候持续变暖是冻融荒漠化问题加剧的内在原因,过度放牧、草地超载是造成冻融荒漠化快速发展的主

要人类活动影响因素。由于青藏高原气候的暖湿化趋势,永久性冻土的持续退化将造成冻融荒漠化进一步加剧,应引起足够重视。

参考文献(References):

- [1] 胥国盛,王翠萍,李锋,等.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J].林业资源管理,2023(1):1-7.
Zan G S, Wang C P, Li F, et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification[J]. Forest Resources Management, 2023(1):1-7.
- [2] 杨建平,丁永建,陈仁升,等.长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应[J].山地学报,2004,22(3):278-285.
Yang J P, Ding Y J, Chen R S, et al. Permafrost change and its effect on eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3):278-285.
- [3] 张森琦,王永贵,赵永真,等.黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J].冰川冻土,2004,26(1):1-6.
Zhang S Q, Wang Y G, Zhao Y Z, et al. Permafrost degradation and its environmental sequent in the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1):1-6.
- [4] 李森,高尚玉,杨萍,等.青藏高原冻融荒漠化的若干问题——以藏西—藏北荒漠化区为例[J].冰川冻土,2005,27(4):476-485.
Li S, Gao S Y, Yang P, et al. Some problems of freeze-thaw desertification in the Tibetan Plateau: A case study on the desertification regions of the Western and Northern Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4):476-485.
- [5] 唐华,徐琳,格桑平措,等.藏西北革吉县雄巴乡乡镇冻土灾害特征及防治措施[J].中国地质调查,2022,9(2):100-109.
Tang H, Xu L, Ge S P C, et al. Characteristics and preventive measures of permafrost disasters in Xiongba town of Geji County in northwestern Tibet[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(2):100-109.
- [6] 赵云云,赵其华.黄河源头多年冻土退化原因及变化趋势[J].人民黄河,2009,31(6):10-12.
Zhao Y Y, Zhao Q H. Reasons of degeneration and tendency of variation of ever-frost of the Yellow River Source[J]. Yellow River, 2009, 31(6):10-12.
- [7] 史展,陶和平,刘淑珍,等.基于GIS的三江源区冻融侵蚀评价与分析[J].农业工程学报,2012,28(19):214-221.
Shi Z, Tao H P, Liu S Z, et al. Research of freeze-thaw erosion in the Three-River-Source area based on GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19):214-221.
- [8] 王兮之,何巧如,李森,等.青藏高原土地退化类型及其退化程度评价[J].水土保持研究,2009,16(4):14-18.
Wang X Z, He Q R, Li S, et al. Assessment of land degradation on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4):14-18.
- [9] 冉有华,李新,程国栋,等.2005—2015年青藏高原多年冻土稳定性制图[J].中国科学:地球科学,2021,51(2):183-200.
Ran Y H, Li X, Cheng G D, et al. Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005—2015[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(2):183-200.
- [10] 陈俊翰,卢琦,刘雨晴,等.青藏高原冻融荒漠化退化区分布及影响因素[J].水土保持研究,2023,30(3):103-110,120.
Chen J H, Lu Q, Liu Y Q, et al. Distribution and influencing factors of freeze-thaw desertification degradation in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3):103-110,120.
- [11] 高明,李向全,侯新伟,等.大通河源区冻融作用及其生态环境效应[J].山地学报,2015,33(2):141-147.
Gao M, Li X Q, Hou X W, et al. The freeze-thaw action and its eco-environmental effects in Datong river source region of Qinghai[J]. Mountain Research, 2015, 33(2):141-147.
- [12] 李兴隆,王英文.高寒山区冻融侵蚀荒漠化形成及防治[J].沈阳师范大学学报:自然科学版,2017,35(1):80-83.
Li X L, Wang J W. Investigation discussion on freeze-thaw erosion desertification formation and prevention in alpine areas, China[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2017, 35(1):80-83.
- [13] 崔娟娟,信忠保,黄艳章.2003—2020年青藏高原冻融侵蚀时空变化特征[J].生态学报,2023,43(11):4515-4526.
Cui J J, Xin Z B, Huang Y Z. The spatiotemporal variations in freeze-thaw erosion in 2003—2020 on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11):4515-4526.
- [14] 黄婷婷,赵辉,赵院,等.三江源国家公园土壤侵蚀及其分布特征[J].水土保持通报,2023,43(5):95-103,110.
Huang T T, Zhao H, Zhao Y, et al. Soil erosion and its spatial distribution characteristics in Three-River-Source National Park[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5):95-103,110.
- [15] 张建国,刘淑珍,杨思全.西藏冻融侵蚀分级评价[J].地理学报,2006,61(9):911-918.
Zhang J G, Liu S Z, Yang S Q. Classification and assessment of freeze-thaw erosion in Tibet[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(9):911-918.
- [16] 陈同德,焦菊英,王颢霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
Chen T D, Jiao J Y, Wang H L, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3):547-564.
- [17] 全国科学技术名词审定委员会.林学名词[M].2版.北京:科学出版社,2016:342-350.
China national Committee for Terminology in Sciences and Technology. Chinese terms in Forest Science[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016:342-350.
- [18] 国家林草局.全国荒漠化和沙化监测技术规定[S], 2009.
National Forestry and Grassland Administration. National Technical Regulations for Desertification and Desertification Monitoring[S],

- 2009.
- [19] 李红梅, 颜亮东, 温婷婷, 等. 三江源地区气候变化特征及其影响评估[J]. 高原气象, 2022, 41(2): 306–316.
- Li H M, Yan L D, Wen T T, et al. Characteristics of climate change and its impact assessment in the Three – River Regions[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(2): 306–316.
- [20] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783–2795.
- Cheng G D, Zhao L, Li R, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai – Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2783–2795.
- [21] 张倚浩, 阎建忠, 程先. 气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展[J]. 山地学报, 2023, 43(6): 2180–2193.
- Zhang Y H, Yan J Z, Cheng X. Advances in impact of climate change and human activities on wetlands on the Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2180–2193.
- [22] 张江, 袁旻舒, 张婧, 等. 近 30 年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6269–6281.
- Zhang J, Yuan M S, Zhang J, et al. Responses of the NDVI of alpine grasslands on the Qinghai – Tibetan Plateau to climate change and human activities over the last 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6269–6281.
- [23] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374–381.
- Duan A M, Xiao Z X, Wu G X. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979 – 2014[J]. Climate Change Research, 2016, 12(5): 374–381.
- [24] 赵亮, 李奇, 陈懂懂, 等. 三江源区高寒草地碳流失原因、增汇原理及管理实践[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 795–802.
- Zhao L, Li Q, Chen D D, et al. Principles of alpine grassland ecosystems carbon sequestration and management practices on Sanjiangyuan regions, Qinghai – Tibetan plateau[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 795–802.
- [25] 钱前, 张秀娟, 王军邦, 等. 2005—2017 年青海三江源区草地家畜承载力时空格局研究[J]. 草地学报, 2021, 29(6): 1311–1317.
- Qian Q, Zhang X J, Wang J B, et al. The spatio – temporal pattern of grazing pressure in the Three – River Headwaters in Qinghai Province from 2005 to 2017[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6): 1311–1317.
- [26] 程国栋, 金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1–11.
- Cheng G D, Jin H J. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai – Tibet Plateau and it changes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 1–11.
- [27] 刘勇, 魏良帅, 黄安邦, 等. 气候变化下长江源土壤水时空演化及其环境响应[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 39–52.
- Liu Y, Wei L S, Huang A B, et al. Spatial and temporal evolution of soil water and its response to the environment in the Yangtze River source area under climate change[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 39–52.
- [28] 张中琼, 吴青柏. 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 505–511.
- Zhang Z Q, Wu Q B. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai – Tibet Plateau as Climate Warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 505–511.

Remote sensing analysis of freeze – thaw desertification in Sanjiangyuan region

ZHU Gang, GAO Huijun

(Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Bureau of China National Administration of Coal Geology, Xi'an Shaanxi 710199, China)

Abstract: The rapid development of freeze – thaw desertification poses a serious challenge to the ecological security of Qinghai – Tibet Plateau. In order to improve the research level of freeze – thaw desertification and promote scientific prevention and control of freeze – thaw desertification, the authors took freeze – thaw desertification of Sanjiangyuan region as the study object to construct a remote sensing investigation method for freeze – thaw desertification based on geological features. The freeze – thaw desertification in Sanjiangyuan region was studied by this method to analyze its spatial distribution characteristics, the causes and the development trends of freeze – thaw desertification. The results show that the types of permafrost landforms formed in different geographical locations in permafrost distribution areas were the basis for interpreting freeze – thaw desertification and the freeze – thaw desertification was divided into three levels, that is severe, moderate and mild, combined with comprehensive indicators of proportion of exposed surface and fragmented areas, vegetation coverage, and surface landscape characteristics. The remote sensing interpretation indicators for different degrees of freeze – thaw desertification were constructed, and the interpretation accuracy of freeze – thaw desertification in Sanjiangyuan region was over 80%.

The study area was dominated by severe freeze – thaw desertification, and Yangtze River source region has the largest distribution area of freeze – thaw desertification in Sanjiangyuan region. Permafrost was the material condition for the occurrence of freeze – thaw desertification, and the sustained warming of regional climate was the internal cause of the exacerbation of freeze – thaw desertification. And overgrazing and overloading were the main human activity influencing factors that cause the rapid development of freeze – thaw desertification. Due to the warming and humidifying trend of Qinghai – Tibet Plateau climate, the continuous degradation of permafrost will further exacerbate freeze – thaw desertification. The relevant research results indicated that remote sensing survey methods could achieve rapid acquisition of information on freeze – thaw desertification, which has certain reference significance.

Keywords: Sanjiangyuan region; freeze – thaw desertification; remote sensing; distribution characteristics; causes; development trends

(责任编辑: 魏昊明)