

# 祁连山黑河源区央隆草原一带 冻融地质作用及其生态环境问题的探讨

杨鸿魁<sup>1,2</sup>, 庞文龙<sup>1</sup>, 李有三<sup>1,2,3</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 宋先腾<sup>1</sup>, 孟振文<sup>1</sup>, 王雁鹤<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 西宁 810021;

2. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008;

3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 为研究黑河上游水源涵养区生态环境问题, 以祁连山黑河源区央隆草原为例, 采用遥感解译与路线验证相结合的遥感调查手段, 查明了祁连山黑河源区央隆草原一带的冻融地质作用类型、分布特征以及由其产生的生态环境问题。结论如下: (1) 研究区内冻融地质作用类型由山顶至山前平原依次为寒冻风化碎石流带、冻融滑移带、冻胀-融陷带, 呈现明显的山地垂直分带特征, 各分带内发育不同的冻融灾害类型。(2) 在冻融地质作用的持续影响下, 研究区生态环境问题较为突出, 出现了高寒草甸破坏、冻土沼泽面积减少、土壤退化、岩漠化和荒漠化加剧、冻融灾害频发及生态功能性弱化等一系列问题。

**关键词:** 黑河源区; 冻融地质作用; 冻融灾害; 生态环境问题

**中图分类号:** TP753; P694; X171.4 **文献标识码:** A

## DISCUSSION ON THE GEOLOGICAL PROCESS OF FREEZE-THAW AND ITS ECO-ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF YANGLONG GRASSLAND IN HEIHE SOURCE REGION OF QILIAN MOUNTAINS

YANG Hong-kui<sup>1,2</sup>, PANG Wen-long<sup>1</sup>, LI You-san<sup>1,2,3</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>,  
SONG Xian-teng<sup>1</sup>, MENG Zhen-wen<sup>1</sup>, WANG Yan-he<sup>1</sup>

(1. Xining Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Xining 810021, China;

2. Qinghai Normal University, College of Geographical Science, Xining 810008, China;

3. Beijing Normal University, Faculty of Geographical Science, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In order to study the eco-environmental problems in the water source area in the upper reaches of the Heihe River, taking the Yanglong grassland in the source area of the Heihe River in the Qilian Mountains as an example, the types, distribution characteristics and eco-environmental problems of freeze-thaw geological processes in the area of the Yanglong grassland in the source area of the Heihe River in the Qilian Mountains were identified by means of remote sensing interpretation and route verification. The conclusions are as follows: (1) the types of freeze-thaw geological processes in the study area from the top of the mountain to the piedmont plain are cold freeze weathered gravel flow zone, freeze-thaw slip zone and frost heave thaw depression zone, showing obvious vertical zoning characteristics of the mountain, and different types of freeze-thaw disasters are developed in

each zoning. (2) Under the continuous influence of the freeze-thaw geological process, the ecological environment problems are more prominent. There are a series of problems, such as the destruction of alpine meadows, the reduction of frozen soil marsh area, soil degradation, the intensification of rocky desertification and desertification, the frequent occurrence of freeze-thaw disasters and the weakening of ecological functions.

**Key words:** The Source area of Heihe River; geological process of Freeze-thaw; Freeze-thaw disaster; eco-environmental problems

黑河中上游多年冻土区非常发育,是黑河流域的主要产流区<sup>[1,2]</sup>。近年来,黑河上游水源涵养功能退化,生态环境不断恶化,对黑河中下游产生了严重影响,致使中下游河流径流减少,荒漠化、沙漠化程度加剧<sup>[3]</sup>。而央隆草原处于黑河流域的源头,因其特殊的地理位置,在黑河流域生态环境保护研究中占有极其重要的地位。

冻融作用是多年冻土区较为普遍常见的外动力地质作用,与冻土地貌景观的分布和生态环境问题的形成有着直接联系<sup>[4]</sup>。王庆峰<sup>[5]</sup>等对祁连山区黑河上游多年冻土区的分布进行了考察;王生廷<sup>[6]</sup>等对祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势进行了分析探讨;黄斌<sup>[7]</sup>等对祁连山北麓春季冻土对气候的响应作了相关研究;李静<sup>[8]</sup>等对黑河流域的生态环境演变进行了分析讨论。但是针对祁连山黑河源区的冻融地质作用及其引发的生态环境问题的相关工作鲜见报道。

本文以祁连山黑河源区央隆草原为例,依据在祁连山地区开展的1:25万环境地质调查(冻融灾害专项)项目,依靠遥感调查相关手段<sup>[9]</sup>,对黑河源区央隆草原一带的冻融作用类型和相关生态环境问题进行分析 and 探讨。冻融灾害对生态环境问题的影响是不容忽视的要素之一,特别是在祁连山生态脆弱区、敏感区。查清该区域内冻融灾害的主要类型、分布范围,查明冻融灾害危险性区划对于祁连山央隆草场的合理开发和保护利用具有现实意义。掌握冻融灾害直接引发和间接诱发的生态环境问题将对祁连山生态保护区的治理修复有重要的指导意义。

## 1 研究区概况

黑河源区位于我国青海省海北州祁连县,包括祁连县央隆乡全境及野牛沟乡的大部,总面积2 600 km<sup>2</sup>。本文讨论研究的黑河源区央隆草原是处于走廊南山和托勒山两大山脉之间的一块闭合草地,两大山脉呈北西、南东走向延绵于研究区南北两侧,托勒河自东向西流贯全境,下游注入甘肃省北大河。

研究区内最高峰为瓦黄寺西岔主峰,海拔5 287

m,平均海拔3 200 m以上。南北两侧山脊高达4 000 m以上,常年积雪不化,现代冰川分布。天然草场主要分布在托勒河谷滩地和两侧山地,草场面积 $18.25 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,占全乡总面积的71.4%,可利用草场面积 $17.9 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>。土壤类型主要有高山草甸土、高山草原土、山地栗钙土、栗钙土等,草场类型以高寒草甸和山地草原为主。研究区受西北风环流和高山影响,风多且大,寒冷干旱,变化剧烈,光照充足,日较差大,年平均温度-3.2℃,年降水量272.7 mm,年均蒸发量1 496.6 mm。牧草生长期135 d左右,青草期100 d。

## 2 冻融作用类型

因特殊的自然地理环境,黑河源区央隆草原一带冻融作用发育普遍且强烈。调查研究表明,研究区内冻土分布符合纬度地带性规律和垂直分带规律。多年冻土主要分布在高海拔地区,季节冻土则主要分布于河流沟谷、低海拔地区。研究区除水体外,其余全部为冻土区,多年冻土和季节冻土连续发育。

研究区的冻融作用主要表现为寒冻风化作用、冻融滑移作用和冻胀-融陷作用。由高海拔到低海拔依次呈现:高山顶端基岩裸露、寒冻风化碎石带;山坡发育冻融滑移带;山前冲洪积平原及河流阶地冻胀-融陷带3种冻融地质作用类型(图1)。冻融作用的发育与海拔、温度、降水、植被覆盖、岩性等因素密不可分,常见于阴坡位置。

### 2.1 寒冻风化碎石带

研究区内的基岩裸露区、碎石流主要分布在央隆草原两侧高山——走廊南山和托勒山一带,地形陡峭,冰川分布。崩裂的碎石块在重力侵蚀、风力侵蚀及季节性雨水冲刷下,垂直方向上呈明显的环带状、面状展布,形成“石川”、“石海”(图2)。

高海拔地段坡度更陡,水分涵养条件差,土壤基础差,植被活动强度更弱或不<sup>[10]</sup>。从路线验证来看,在寒冻风化作用下形成的岩屑碎石流坡规模不断扩大。图2是央隆草原高山在寒冻风化剥蚀作

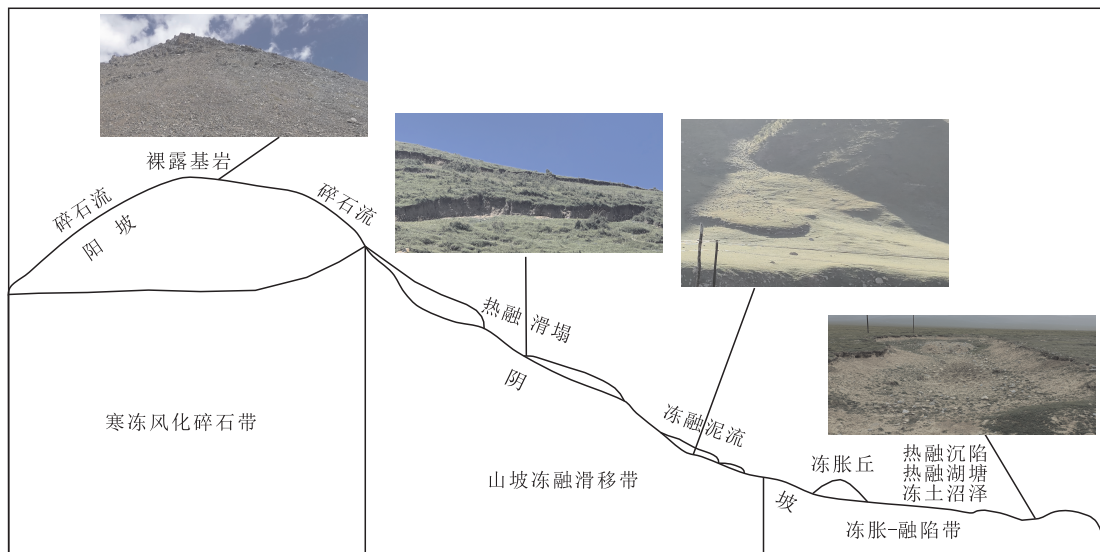


图1 源区冻融地质作用类型模式图

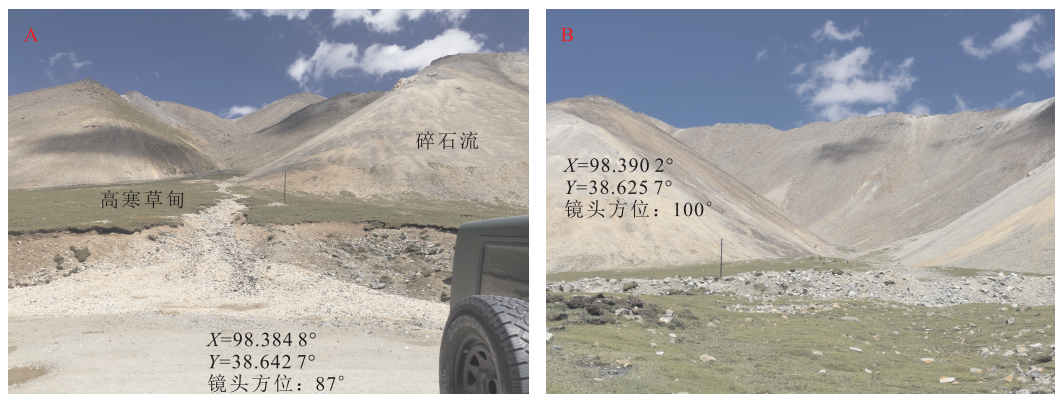


图2 寒冻风化剥蚀作用下的基岩裸露区、碎石流带

用下的基岩裸露、碎石流带,水平延伸超过几公里,从山顶到坡脚均被碎石流覆盖(图2B)。冻融和机械风化共同作用,破碎岩石沿坡向下覆盖,直接造成草地资源被压盖,破坏地貌景观,影响高寒草甸分布,制约牧业发展。

## 2.2 山坡冻融滑移带

冻融侵蚀是由于温度的频繁变化引起的冻融交替导致土壤和岩石性质发生变化<sup>[10]</sup>。高寒草甸分布的坡度较大的地区,成土环境极不稳定。受坡度、岩性、地表植被覆盖等因素影响,经冻融和干湿交替作用,冻土区岩屑坡往下的山地斜坡多发育冻融滑移、热融滑塌、冻融泥石流等常见的冻融地质灾害。

### 2.2.1 冻融滑移

冻融滑移是反复的冰冻消融和干湿条件对表层土壤共同作用的结果。当气候寒冷,表层土壤因冻胀鼓起;当天气转暖,又消融沉陷,致使上覆土壤崩裂。坡度和重力作用影响下,缓慢往下坡方向产生

位移,形成如“阶梯状”或“鱼鳞状”的草皮(图3)。通过测量,滑移距离在5~20 cm不等,较陡地段可达30~50 cm,陡坎处可见砂砾石或基岩出露。遭受温度升降、雨水冲刷、重力及风力剥蚀等长时间作用,滑移距离更大,连点成片,土壤层被不断剥蚀,导致整个山坡形似“秃顶”,草地完全退化,最终向裸地发展(图4)。

### 2.2.2 热融滑塌

热融滑塌是多年冻土层或含土冰层融化导致的地表沉陷滑塌的冻融地貌,是冻融滑移过程的进一步发育。沿着省道S204往央隆乡方向,在5°~30°的坡麓上冻融滑塌现象普遍发育。常沿公路一侧呈面状、带状分布。因人为工事,斜坡的地下冰层暴露,导致原先冻土层的热平衡状态和水热条件被破坏,受温度、降水、风力及重力等因素的持续作用,上覆植被和土层失去支承而塌落(图5)。岩土体裂开、垮塌致使植被破裂成分散的块体,破坏了植物立



图3 “鱼鳞状”的草皮

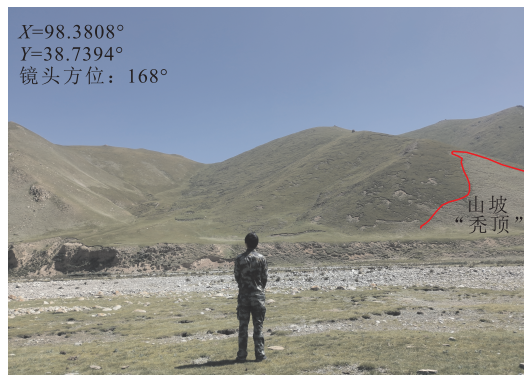


图4 冻融作用使山坡“秃顶”

地生长的条件。受冻融作用侵蚀,滑塌体不断向顶部及两侧延伸,滑塌规模不断扩大,造成土壤和草地面积急剧减少。冻融作用的持续使整个山坡都会发生滑塌,具有“溯源性”,对原始地貌景观极具破坏性。



图5 省道 S204 旁冻融滑塌现象

### 2.2.3 冻融泥流

冻融泥流是我国寒区特有的自然坡体失稳发生破坏的现象,与人为扰动没有必然联系,是不可控的自然灾害<sup>[11]</sup>。草地中有机质和土壤颗粒等物质胀

缩性不一,常引起平面上植被撕裂,垂向上植被层与下伏土层的分离,为冻融泥流提供物质来源,加速了土壤的剥蚀和流失作用<sup>[12]</sup>。研究区内央隆一带坡度在 $8^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,地表覆盖物以碎块石、细沙、粘性土为主,宜于水分储存的山坡,是形成冻融泥流较多的地段。当气候转暖,冻土层融化,雨水作为渗透剂和润滑剂,斜坡在高含水量或饱和状态下,土体强度减弱<sup>[13,14]</sup>,滑动层上部的物质受重力作用发生缓慢蠕动而形成泥流。在反复的冻融交替下,蠕动距离增大,泥流规模也随之变大。局部地段可形成泥流陡坎、泥流舌、泥流阶地等地貌类型。

五个山河三岔沟一带冻融泥流较为发育(图6)。该处海拔3900 m左右,最大坡度约 $12^{\circ}$ ,泥流主体滑动方向 $286^{\circ}$ ,整体呈长舌状沿山坡展布。主要由砂土、黏土、碎石组成,发育在上部冻融层中,沿着山坡,呈面状展开。泥流舌延伸至沟口处,中后部位坡度大,表面凹凸不平,系蠕流挤压形成。泥流陡坎高约3~5 m,底部砂砾石裸露。泥流阶地发育约8~9级,每一级几十厘米不等,阶地前缘稍向下倾斜。地表覆盖有植被,泥流活动区域植被少有覆盖,含水性较高,呈流塑状态。冻融泥流的进一步发育,会阻塞河道,破坏地貌景观。

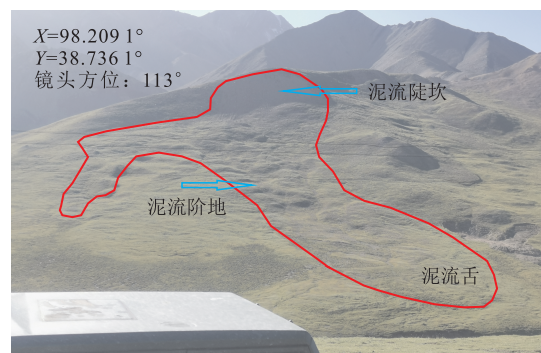


图6 央隆五个山河三岔沟一带冻融泥流全貌

### 2.3 山前冲洪积平原及河流阶台地冻胀-融陷带

源区在冻融作用下主要形成冻胀丘、热融沉陷和冻土沼泽等(图7)。

冻胀丘是由于地下水受冻结地面和下部多年冻土层的遏阻,在薄弱地带冻结膨胀,使地表变形隆起的一种冻土地貌。土壤发生冻胀是由于土壤温度降至冰点以下,土体原孔隙中部分水结冰体积膨胀,更主要的是在土壤水势梯度作用下未冻区的水分向冻结前缘迁移、聚集并冻结,体积膨胀所致<sup>[15]</sup>。大多分布在多年冻土或季节性冻土区地下水相对富集的沟谷和河流阶地。央隆一带在五个山河、瓦乎寺河及托勒河河流两侧阶地最为常见(图7A)。冻胀丘

分布较为集中,一般呈半圆-椭圆丘状,直径20~80 cm,高出地表5~30 cm,其顶部见有冻胀裂缝发育。一般在冬季冻胀隆起,气候转暖(7~9月份)后逐渐消融沉陷。本地区发育较为广泛,对草场结构、公路路基都产生了较大的影响<sup>[16,17]</sup>。图7B位于季节性冻土区,受温度、降水影响极为明显,经反复的冻胀作用引起路基不均匀沉降,使路面产生宽约5~8 cm宽的裂缝。

热融沉陷是由于多年冻土区的地下冰或冻土因自然或人为因素影响,打破其热平衡状态后地表土层消融陷落而形成的一种负地貌,积水后形成热融

洼地或热融湖塘<sup>[18]</sup>。工作区热融湖塘发育,主要分布在高平原、山间盆地及洼地及小于3°的缓坡,一般呈半圆或不规则状,直径30~60 cm,积水深度10~15 cm。由于反复的冻胀塌陷,部分草皮已经退化,土壤裸露,势必会加剧荒漠化的进程。

冻土沼泽主要在地形相对平坦、地表水流排泄不畅的山前平缓地带分布。主要见于央隆乡红土沟、窑洞沟一带。随季节变化,气温回暖时冻土层消融成小范围的积水区域。积水区内冻胀丘伴生,直径一般5~40 cm,高10~30 cm,丘体见发育冻胀裂缝(图7C)。



图7 冻胀丘、冻胀作用、冻土沼泽

### 3 生态环境问题

黑河源区央隆草原一带多年冻土和季节性冻土均有分布,冻融作用发育较为普遍,是影响研究区生态环境脆弱性的主要因素。研究区内生态环境问题主要表现在高寒草甸破坏、冻土沼泽面积减少、土壤退化和荒(岩)漠化加剧、冻融灾害频发及生态功能性弱化等5个方面。

#### 3.1 高寒草甸破坏

冻土区受冻融作用影响,成土环境不稳定,经受反复的干湿、冻结消融后,改变了土壤物理及结构力学特征而削弱土壤抗蚀性<sup>[19]</sup>,随物理风化剥蚀,使得土壤表层成凹陷的“斑块状”,“斑块”面积越来越大,破坏了植被和土壤层的完整性,草甸无法依附,掉落直至死亡。路线调查中发现现在走廊南山、托勒山一带坡麓均存在草甸被破坏后退化形成的大片“秃斑”的现象。

#### 3.2 冻土沼泽面积减少

冻土沼泽常见于地形相对平坦、地表水流排泄不畅的山前平缓地带,是多年冻土区的水源涵养地,也是生态敏感区<sup>[20]</sup>。其为动植物生存提供了水环境、食物等,在保持生物多样性和珍稀物种资源、调节地表径流和维持生态平衡方面有着极为重要的作用<sup>[21]</sup>。随气候变暖,冻融作用持续进行下直接导

致区内地下水水位下降,地表河流补给减少,造成冻土沼泽退化而向“裸地”发展。

#### 3.3 土壤退化、岩漠化和荒漠化加剧

土壤退化是冻融作用、风力侵蚀、气候及人为因素共同作用的结果。央隆一带多年冻土区的土壤或岩层在冷热交替作用下,发生冻胀、融沉、流变等现象,加剧岩石的崩裂、碎砾化。研究区内岩漠化主要分布于高海拔地段,沿坡面呈面状、带状展布。荒漠化在山坡中下部常有发育。此外,风力侵蚀因素不容忽视。风力侵蚀面积1 081.95 km<sup>2</sup>,其中托勒河滩地风力侵蚀面积达581 km<sup>2</sup><sup>[22]</sup>。鼠害严重,啃食植物根系。过度放牧等各因素共同驱使土壤“斑块状”加剧。加快了土壤荒漠化、山区岩漠化的进程。

#### 3.4 冻融灾害频发

岩石由于经受寒冻风化冻融侵蚀,使岩石裂解形成山顶部裸岩区、岩屑坡、碎石流等,沿山坡向下移动过程中会压盖草场,破坏地表植被附着的环境,影响高寒草甸分布;因冻融作用形成的冻融滑移、热融滑塌、冻融泥石流、冻融沉陷等地质灾害不仅会威胁草地发育,还会随着规模的扩大阻塞河道、公路地基沉降、破坏公路。冻融灾害呈多点分布态势,具有很强的危害。

#### 3.5 生态功能性弱化

黑河流域的中上游是流域内水资源的主要形成

区,调节着整个流域内的水量、气候等。冻融作用是多年冻土区一种普遍的外动力地质作用,对生态环境的影响显著。冻土区分布的裸岩、热融滑塌、冻融泥流、冻胀丘等冻融灾害不仅威胁人与动植物的生存繁衍,而且会破坏地形地貌和自然景观<sup>[23]</sup>。碎石流掩埋植被,剥蚀土壤层,引起土壤中微生物群落的变化,造成微生物数量减少<sup>[24]</sup>。冻融作用的持续会导致动植物在数量和种类上多样性减少或向单一性发展,导致生物多样性减少,使研究区的生态功能性弱化。

## 4 结论

(1) 黑河源区央隆草原一带多年冻土和季节性冻土都有发育,且连续型分布。从走廊南山、托勒山到托勒河河谷一带,冻融作用具明显的山地垂直分带特征。在寒冻风化侵蚀、冻融滑移、冻胀-融陷等冻融作用下,形成了高山顶端基岩裸露、寒冻风化碎石带,山坡冻融滑移带,山前倾斜平原、沟谷区冻胀-融陷带等冻土地貌类型。

(2) 在冻融作用的持续发育下,也使得研究区生态环境很脆弱,形成并加剧了冻融灾害的发生,出现了一系列的生态环境问题——高寒草甸被破坏、冻土沼泽面积逐渐减少、土壤退化和岩漠化、荒漠化加剧、生态功能性弱化等。

(3) 青藏高原气候转暖的背景下,冻融作用加剧、过度放牧、人类工程等因素的干预,已对祁连山冰川冻土层的埋藏条件、分布等产生重大影响,进而影响到冻土稳定性。冻土消融会释放土壤中的有机质,使得碳排放量增加。对畜牧业的可持续发展以及生态环境的保护修复形成阻碍。多年冻土区生态问题形势严峻,必须引起重视。

(4) 本文依据开展项目仅仅对黑河源区央隆草原一带的冻融地质作用和相关的生态环境问题进行了分析归纳,研究不够深入全面,针对冻土区涉及各要素间的相互作用、成因机理等问题认识较浅,是今后工作研究的重点。

## 参考文献

- [1] 王宁练,张世彪,贺建桥,等. 祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域的同位素示踪研究[J]. 科学通报, 2009, 54(15): 2148-2152.
- [2] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社, 2000: 309-326.
- [3] 杨晓敏. 黑河流域水资源和生态环境问题研究[J]. 发展研究, 2012, 255(1): 73-75.
- [4] 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.
- [5] 王庆峰,张廷军,吴吉春,等. 祁连山区黑河上游多年冻土分布考察[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 19-29.
- [6] 王生廷,盛煜,吴吉春,等. 祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 27-37.
- [7] 黄斌,郭江勇,强玉柱,等. 祁连山北麓春季冻土深度对气温变化的响应[J]. 干旱区研究, 2009, 26(5): 639-643.
- [8] 李静,桑广书,刘小艳. 黑河流域生态环境演变研究综述[J]. 水土保持研究, 2009, 16(6): 210-214.
- [9] 张富广,曾彪,刘太保. 近30年祁连东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布范围及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 305-312.
- [10] 马思顺,陈志雄,王瑞雪,等. 遥感技术在地质灾害调查中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28(04): 80-86.
- [11] 孙宝洋,李占斌,肖俊波,等. 冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 337-347.
- [12] 石长安. 冻融泥流特性及影响因素分析[J]. 科学技术创新, 2018, 24: 120-121.
- [13] 董瑞琨,许兆义,杨成永. 青藏高原冻融侵蚀动力特征研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 12-16.
- [14] 林峰,徐蓉,陈宁. 地下水对土坡稳定性的影响分析[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 10(4): 41-45+66.
- [15] 郝君民,吴通华,李韧,等. 青藏高原东北部青海玉树泥石流滑坡特征和成因分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 447-456.
- [16] 宋琿,宋明,袁文忠. 季节性冻土地区路基的冻胀与融沉[J]. 路基工程, 2007, 130(1): 26-28.
- [17] 张敦虎,卢中正,强建华,等. 地面塌陷特征及其遥感识别方法研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(03): 8-12.
- [18] 邱国庆,刘经仁,刘洪绪,等. 冻土学辞典[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1994: 275.
- [19] 王恩焯,赵雨森,陈祥伟. 典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1744-1750.
- [20] 王辉. 玛曲高寒草甸沙化特征及沙化驱动机制研究[D]. 兰州:兰州大学, 2007.
- [21] 邵继,李文明,刘会文,等. 泽曲河源区冻融地质作用及其生态环境地质效应[J]. 青海大学学报, 2020, 38(5): 92-99.
- [22] 沙国林. 祁连县央隆乡草地退化现状调查[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2008, 38(1): 33-34.
- [23] 宋词,郑光玉,黄炬斌,等. 高寒灌丛草甸区的弃渣体场地生态修复技术研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(01): 109-112.
- [24] 田路路,隗英华,孙文涛. 冻融作用对土壤微生物的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 438-443.

作者简介: 杨鸿魁(1992—),男,青海湟中人,工程师,硕士在读,主要从事遥感地质调查及自然要素观测方面研究工作。

E-mail: 1456711871@qq.com