

青藏公路沿线环境演化及环境保护对策

汪双杰, 周文锦

(中交第一公路勘察设计研究院 西安 710075)

摘 要: 青藏公路于 20 世纪 50 年代初建成通车以来, 特别是 70~80 年代黑色路面铺筑后, 冻土环境不断恶化。基于近 50 年来青藏公路沿线环境演化规律, 分析冻土环境与生态环境及工程稳定性三者之间的相互依赖关系, 提出保护冻土环境和生态环境的对策措施。

关键词: 青藏公路; 冻土; 环境保护

青藏公路位于号称地球第三极的青藏高原腹地, 由北至南穿越多年冻土区达 630 余 km。从 1954 年通车至今的 50 年间, 随着全球气候的变暖以及 20 世纪 70 年代以后青藏公路黑色路面的修建贯通, 黑色路面下多年冻土融化或形成融化夹层, 导致路基沉降变形^[1]。为改善青藏公路行车条件而对青藏公路进行了几次大规模整治、改建活动, 修建兰州—西宁—拉萨通讯光缆, 特别是青藏铁路的建设等, 更加重了多年冻土与原有环境差异较大的热输入。此外, 公路等建设带来的原有地下水、地表水资源结构改变, 地表径流和路侧积水等均直接或间接影响到多年冻土的稳定性。

由于平均海拔高, 气候寒冷, 物质循环缓慢, 在青藏公路沿线的物种生长发育明显低于其他地区, 如高寒草甸植被, 在其生长周期内植物的生长高度一般仅为 10~30 cm, 并且物种群落结构简单, 每平方米的样地内物种种类仅为 8~20 种, 层次分化不明显, 仅有 2~3 层, 公路沿线生态环境无论是在其内部结构或是外部环境特征上都具有十分明显的脆弱性。青藏高原系统结构简单, 生态系统稳定性不良, 能够承受的外界压力比较小, 一经较强的扰动, 则生态系统便发生崩溃, 其主要表现为生物物种数量减少, 种群覆盖度降低, 土壤受到明显的侵蚀。调查发现, 1975 年开挖输油管道时被破坏的植被至今尚未完全恢复; 20 世纪 70~80 年代改建青藏公路时铲除植被的位置仍荒秃一片。公路两侧的取土坑破坏了自然植被, 甚至部分取土坑局部长期积水, 有的

已发展为热融湖塘。

20 世纪后期, 青藏公路沿线自然植被有不同程度的退化或破坏现象。根据不同年代的卫星航片解译分析, 三江源自然保护区范围内(昆仑山—唐古拉山)的主要植被类型——高寒草原和高寒草甸退化速度在不断加剧。高寒草甸在 20 世纪 80 年代以前的年平均退化速率为 3.9%, 到 20 世纪 90 年代上升为 7.6%; 高寒草原 20 世纪 80 年代的年平均退化速率为 2.3%, 到 20 世纪 90 年代上升到 4.6%。

为保护和改善青藏公路沿线自然环境, 国家又将投资整治青藏公路环境景观提上日程, 因此认识青藏公路沿线环境特点及其演化规律, 对提高环境保护对策的针对性、有效性十分必要。

1 气候变化与冻土环境响应

1.1 气候变化

全球气候变暖是当今国际社会十分关注的问题, 从 20 世纪 40 年代以来, 全球平均气温升高 0.5℃~1.0℃, 青藏高原的气温波动与北半球变化大致相同。高原近代气候变化研究结果表明, 1955 年前为高温期, 1960 年~1970 年间为低温期, 1980 年以后为高温期, 80 年代与 70 年代的年平均气温上升 0.3℃~0.4℃。气候学家建立了近百年全球气温曲线, 证明 20 世纪气候变暖是不争的现实, 1998 年是 19 世纪中叶以来最暖的一年, 甚至有些学者认为可能是近千年来最暖的一年^[2,3]。

科学家利用青藏高原古里雅冰芯过去近 2 000

年的温度代用资料,用奇异谱分析方法,对气候变化的趋势及人类活动造成的影响进行分析,发现青藏高原冰芯中甲烷浓度记录与气候变化有更为密切的联系,说明工业革命以来由于人类活动的增加而引起的温室气体等的排放,确实引起了过去一个多世纪气温的急剧增暖,人类活动对气候变暖的贡献已远远超过了气候的自然变暖过程。政府间气候变化委员会(IPCC)根据各种气候变化预报模型的预测结果,对大气中 CO_2 浓度增加1倍情况下未来全球气候变化所做的初步结论认为,21世纪全球气温每10年平均约升高 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。据预测,加拿大今后50年内,地表温度将升高 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,阿拉斯加北部活动层的深度将由 0.5 m 延伸至 0.93 m ,导致地表以下 30 m 处的温度升高 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,地温升高将导致冻土的融化、多年冻土上限下降,直接影响多年冻土区工程安全^[4~6]。

1.2 冻土退化

在全球气候变暖的背景下,青藏高原气候亦随之转暖并影响着高原多年冻土发育和分布,而高原多年冻土温度、厚度及空间分布的变化则是对气候变化的响应。人类工程活动中开挖地表、铲除植被、修筑路堤等,都要产生强烈的热侵蚀作用,改变土体与大气的热交换条件,从而使地—气相互作用的产物冻土温度场发生变化,导致地温平衡状态变化,干扰冻土环境和生态环境自然平衡能力。

青藏公路路基下冻土退化过程明显高于天然状态,多年冻土由1979年 550 km 减至1991年的 522 km ,退化约 28 km ,岛状多年冻土由1979年的 210 km 减至1991年的 191 km ,退化约 19 km 。工程作用显然对冻土环境的变化产生了巨大影响。而天然状态下北界向南界退化 $0.5\sim 1.0\text{ km}$,南界向北退化 $1\sim 2\text{ km}$ 。青藏公路沿线冻土地温监测结果表明,70年代到90年代青藏公路沿线的季节冻土、融区及岛状多年冻土区的地温升高了 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,连续多年冻土区年平均地温升高了 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻土退化过程将对冻土路基稳定性产生极大的破坏作用^[7]。到2040年以后,青藏公路年平均地温普遍可提高 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,将使青藏高原冻土发生明显的变化,目前小于 10 m 厚的多年冻土层大体上已消融,多年冻土分布下界将升高 $150\sim 200\text{ m}$;目前的岛状冻土区大部分将不复存在,局部地段变成深埋藏(埋深大于 10 m)的多年冻土,青藏高原多年冻土总面积明显减小;目前不稳定型和过渡型多年冻土将大部分演变为“高温冻土”,同时冻

土强度降低,承载力下降,工程稳定性变差。

在局部地段人为因素的影响是不可忽视的,如风火山冻土站周围,20世纪70年代人为破坏的地段,年平均地温较附近天然地表下高 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;目前青藏公路(沥青路面)在多年冻土区内的 $60\%\sim 70\%$ 路段路基下的多年冻土呈不衔接状,形成厚 $0.5\sim 6.0\text{ m}$ 的融化核。可见类似这样地段的人为因素影响程度已变为主导因素,所以未来高原冻土变化趋势很大程度上取决于人类经济活动的影响程度。

1.3 水环境变化与沙漠化

根据青藏公路沿线调查,楚玛尔河高平原广泛分布的高原湖泊和热融湖塘,部分水体已经干涸。另据资料,昆仑山~唐古拉山之间的三江源自然保护区多数冰川呈退缩状态,导致冰川资源的快速丧失,下游地区地面和地下水源减少,引起湿地和湖泊萎缩。如沱沱河源头姜古迪如冰川退缩率每年达 $7.4\%\sim 9.1\%$ 。20世纪90年代以来江河源区水系处于明显的枯水期,湖泊、河滩沼泽型湿地趋向疏干化发展。许多湿地在萎缩干涸以后沼泽泥岩裸露,形成次生裸地或荒漠化土地。伴随湿地萎缩,湿地生物多样性大大减少。

青藏公路沿线的楚玛尔河、红梁河、秀水河、沱沱河、通天河等地属于冰水沉积、河流冲积的砂砾层,具有丰富的沙源,强盛的风力和稀疏低矮的植被等独特的自然条件成为沙漠化形成和发展的条件。青藏高原的沙丘多为半固定和流动沙丘,与谷地平行分布,运动速度快,厚 $0.1\sim 1\text{ m}$ 左右的细沙层在地表广泛分布。数十年来,青藏公路沿线的沙区在不断扩大,沙漠化在加速。研究表明:表面有沙层覆盖的地段融化深度大、地温高、冻土薄,一些冻土区的沙区已经演化为融区。沙丘下地温一般高于其他地段,青藏公路沿线66道班 1.6 m 高的沙丘下 18 m 深处年均地温比附近没有沙层覆盖的地段高 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;冻土上限为 3.3 m ,比邻区深 0.6 m ^[8]。由于气候持续转暖和人类活动不断增加的影响,使高原多年冻土呈区域性退化状态,多年冻土退化造成季节融化层增厚或下伏多年冻土层完全消失,导致地下水位降低,表土层水分减少,地温升高,地表变干,促使草场类型和植物种属随之变化,加速草场退化的速度,致使草场重度退化地段出现沙漠化。从西藏那曲地区草场类型退化分析,退化最严重的是高寒沼泽化草甸和亚高山草甸,这两类草地恰好是多年冻土最发育的地区,由此可见草场退化和土地沙漠化与多年

冻土退化有密切关系,冻土退化是促使多年冻土区沙漠化的独特自然因素^[9]。

2 冻土环境改变与工程的相互作用

冻胀与融沉是青藏公路两大主要病害,其原因是气候变化和工程建设改变了多年冻土的生存环境条件,加快了多年冻土退化,导致冻土温度变化,使冻土环境丧失恢复能力。冻胀常见破坏是冻融翻浆,占工程病害的15%,其中对桥涵构造物影响极大,由于冻胀作用导致涵台、涵底、八字墙开裂倾斜等;青藏公路病害中的85%由融沉引起,主要表现为路基凹陷、纵向开裂以及路基边坡开裂、滑塌等^[10]。

在青藏高原多年冻土区,沥青路面的铺筑改变了地表与大气间的热交换关系,尤其是路面水分蒸发量大量减少,致使路面温度升高,多年冻土层内能量积累增多,地温升高,60%路段下的冻土沿深度方向不衔接,形成融化夹层,路基处于不稳定状态。路基坡向性对路基下冻土影响较大,融沉发育规模在路堤的阳坡和阴坡截然不同,阳坡面太阳照射时间长、强度大,因而阳坡面吸热大于阴坡面,阳坡面多年冻土融化程度大于阴坡;路堤越高受阳坡面面积越大,则热效应越强,路基阴阳坡面引起的融沉差异亦越明显。

修建青藏公路,采用了大规模机械化的施工方法,在路基两侧就地推土填筑,形成宽5~40 m、深2~3 m的条形取土坑。这种大面积铲除地表植被的施工方法,破坏了公路两侧脆弱的冻土环境,改变了地表状态和土体内部的冰—水平衡状态,产生热融湖塘和洼地,引起地表积水。地表水具有高热容量,其下渗将给多年冻土输入较大热能,造成多年冻土融化加剧。纵观青藏公路,路基沉陷变形集中、严重的路段多发生在地形平坦开阔排水不良的区段,如楚玛尔地形平坦,路基排水困难,加之排水系统不完善或已损坏,地表水下渗严重。另一方面地形与地下潜水面形态具有一定程度的一致性,地形平坦则地下水面亦然,地下水径流缓慢,下渗的地表水长期滞留于路基下造成多年冻土不断融化。相反,若路线两侧地形在横断面或纵断面方向具有一定坡度,则发生融陷变形的可能性就很小。路线通过低洼地形的最低部位,势必造成地表积水,亦是地下水汇集区域,因此融沉常是不可避免的,而且非常严重。

青藏公路多年冻土区沿线自然地形较平缓,粘土及亚粘土的斜坡地段,常常含有丰富的地下冰层,

属于含土冰层、饱冰冻土,融冻泥流和滑塌多发生在有厚层地下冰分布的斜坡上。自然环境下,气温升高、河流侵蚀坡脚等可引起融冻泥流和滑塌;公路工程路基挖方或取土坑取土也都可以诱发这一现象。公路施工开挖斜坡坡脚部位,使得活动层下冻土直接裸露于地表,冻土层融化,而地下冰面又提供了良好的滑动面,失去冻结强度的饱水粘土,在冰面与土层间水的润滑作用下,形成随气温波动而反复的泥流和滑塌,如一取土坑引起的热融滑塌体5年内已向山顶推进100 m左右,逐渐影响和威胁公路的通行。其对环境的危害,一是融冻泥流和滑塌造成原本脆弱的植被层的破坏及水土流失,在高原恶劣的气候条件下其上植被极难自然恢复甚至永久损失;二是融冻泥流和滑塌体堵塞公路排水,造成新的水热条件改变,诱发新的冻土环境破坏。

3 环境保护对策

3.1 保护原则

青藏高原多年冻土与动植物群落经过长期演化、演替而逐渐形成一种相对平衡的状态,但这种状态是极不稳定的,任何自然因素、人为因素的变化都会对冻土环境与生态环境产生影响。从环境保护角度看,多年冻土特别是高含冰量冻土对地表的扰动十分敏感,地表一些不大的改变,如植被和天然地表的变化都会引起多年冻土环境重大的不可逆变化,并由此导致公路工程的重大灾害;低温条件和短的生长季节也造成冻土区植被一旦被破坏则极难恢复或恢复缓慢的后果。因此多年冻土地区公路环保对策应遵循保护优先的原则,保护冻土环境与生态环境(特别是植被),也是保证工程安全稳定的首要选择。

由于冻土的特殊性,高原多年冻土区公路环境保护与一般地区有很大区别,即不但要考虑一般地区的生态保护、水土保持等问题,还应考虑冻土环境的保护问题,而且冻土环境与生态环境相互依托、相互作用、相互制约、协调演化。多年冻土的存在可为植物生长提供充分的水分及独特的生态环境。若多年冻土退化,使季节融化深度增大或下伏多年冻土层完全消失,近地表土层地温升高,地下水位降低,含水量减少,植物种属衰减,最后导致土地沙漠化;反之,土地沙漠化使土的导热系数大为增加,势必加剧冻土退化。公路环境保护对策应针对高原多年冻土和生态两个不同的特定环境采取综合治理的原则。从青藏公路及格尔木至拉萨输油管线施工对沿

线植被的影响看,高寒草原、草甸破坏后恢复缓慢,一般需要 5~10 年时间;唐古拉山垭口至当雄、安多一带恢复较快;昆仑山口至唐古拉垭口甚至需要 10 年以上。因此无论是从保护冻土环境还是保护生态环境出发,都应该及时采取综合治理措施,防止冻土退化、加速生态恢复进程。

3.2 工程措施

青藏公路长期研究证明,靠增加路堤高度、路堤两侧设置保温护道和路堤内部设置隔热保温材料等被动保护冻土措施尚不能有效控制多年冻土在气候转暖大环境下的退化进程,冻土路基病害依然在发生、发展。因此,目前国内外均在工程上探索主动冷却路基的方法,通过改善路堤结构和材料,以期调控辐射、对流和传导,藉此吸冷阻热、减少辐射、增强对流,达到冷却路基、改善冻土热平衡状态,进而保护冻土环境之目的。

(1) 减少热辐射措施

路基阳坡面设置遮阳板可直接减少热辐射。据研究观测,1 月份遮阳板下的地表温度比板外地表温度低 $6\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,效果明显。

(2) 增强对流措施

在路堤边坡设置碎石护坡,或在路堤适当位置填筑一定厚度的片、块石层,增强对流效应,保护冻土环境。

利用自然对流换热的无动力热棒是增加冻土冷却的十分有效的措施。青藏公路在因融化核导致路基融沉变形严重的路段可考虑在路基单侧或两侧设置热棒冷却地基,保护冻土环境。青藏公路楚玛尔河高平原段 5.6 km 路基病害严重,布设热棒 1 766 根,测试结果表明其降温效果明显。

除上述措施外,在冻土环境特别敏感的路段,还可考虑设置旱桥、通风管路基的措施等^[1]。

3.3 地表植被保护与绿化

青藏公路大部分海拔在 4 500 m 以上,自西滩向南 630 km 多年冻土区沿线气候寒冷、干燥、土壤贫瘠,植被覆盖率低,表层土壤有机质含量低,多数土壤 pH 值在 7.5 以上,植物种群简单、脆弱,生态环境多年来已遭受一定程度的破坏,因此保护公路沿线地表植被,并通过适宜的绿化措施恢复或保护生态环境系统十分重要。

(1) 绿化原则

宜草则草,宜林则林。绿化保护冻土环境和生态

分、气候条件适宜地段,应尽可能及早绿化,促进新的生态平衡及早形成;冻土区大面积沙化地段或土壤条件较差、气候条件不适应植物生长地段,强行绿化往往得不偿失,不如用投入绿化的费用去实施针对性更好的措施。

采用当地植物种群,促进自然演替。高原严寒缺氧的恶劣环境造就了高原独特的动、植物种群,其生存演替已形成自己的规律和条件,绿化物种的选择应尽可能采用当地生长态势良好的强势品种。

移植和播种相结合。当地植被状况较好的地段,可以选择生态自我修复能力强的位置按一定的要求切铲地表植物移植绿化;植被恢复较慢地段为尽快实施绿化以保护冻土,减轻水土流失,可考虑客土喷播绿化。

(2) 绿化位置

① 路基

青藏公路沿线路基填料以砂土或砂砾土为主,质地普通较粗,粘粒含量较少,干燥松散。路基边坡雨季易受雨水冲刷,旱季易受风蚀,路基边坡的绿化是公路绿化的重点。青藏公路路基一般为填方,受日照影响阳坡面吸热量易导致冻土上限提升且融化盘偏移,故从保护冻土角度出发,阳坡面更宜绿化,植被覆盖后可大大减少导热系数;同时为加强保温护道效果,保温护道也宜绿化。路基边沟、排水沟由于位置低易蓄水且不易风蚀,在路基绿化中条件最好,因此应根据当地情况结合边沟、排水沟整体方案进行绿化。

② 取土坑

青藏公路沿线就地取土后遗留的取土坑,原天然地表植被施工期末予保存回植,取土后裸露的多年冻土长期暴露在空气中,挖方前缘冻土融化形成热融滑塌、融冻泥流,加剧水土流失,导致高寒植被的退化。有的取土坑虽历经数十年自然演替,但植被恢复极其缓慢,造成千孔百疮之感。因此对公路沿线 50 m 范围内的原取土坑应进行绿化。

(3) 绿化方式

高原多年冻土地区绿化几乎无可能栽植乔、灌木,绿化以植草为主。受特殊的自然地理、气候条件限制,一般地区绿化方法不可能照搬到多年冻土地区,目前交通部在西部交通项目科研中已开展这方面的研究,铁道部在青藏铁路建设期间也开展了相关研究。根据相关研究成果,在海拔 5 000 m 以下,年平均气温 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,年降水量大于 260 mm,土壤 pH 值小于 8.0 的环境条件下可以建立人工植被,边坡可以采用

植被保护措施;垂穗披碱草和老芒麦是青藏高原公路路基理想的护坡植物种类;利用腐殖土、喷播或播种后的覆盖措施和保水保温是绿化成功的重要措施。

3.4 完善排水系统

青藏公路对冻土区路基排水没有引起足够的重视,没有形成有效的排水系统,边沟积水严重,加之路侧取土坑距离路基坡脚过近,造成局部路段取土坑积水倒灌边沟。由于水的储热作用,在其长期下渗过程中将大量热量输入冻土中,致使积水路段逐步发展为热融湖塘,危及路基安全。因此清理疏通排水沟,将路侧积水引至路基外一定距离的自然低洼集水处,对减轻水引起的融沉是十分必要的。

4 结语

公路建设对环境的影响由人类活动、工程活动引起,贯穿于施工期及运营期。施工期以工程活动影响为主,运营期以人类活动影响为主。由于青藏公路海拔高、空气稀薄,气候寒冷、干旱,动植物种类少、生长期短、生物量低、食物链简单,生态系统中物质循环和能量的转换过程缓慢,致使本区生态环境十分脆弱。长期的低温和短促的生长季节使寒冷地区的植被一旦被破坏,恢复十分缓慢,而且加速冻土融化,引起土壤沙化和水土流失。因此,青藏公路环境保护归根结底还是对冻土环境的保护。在全球气候升温趋势不可逆转的条件下,环境保护对策应体现主动保护、积极预防、综合治理的思想,深刻认识冻

土环境的演化规律,采取针对措施。

参考文献:

- [1] 汪双杰,李祝龙,武警民. 多年冻土地区公路修筑技术研究现状与新课题[J]. 冰川冻土,2003,25(4).
- [2] 吴中海,赵希涛,吴珍汉,等. 西藏纳木错及邻区全新世气候与环境变化的地质记录[J]. 冰川冻土,2004,26(3).
- [3] 杨梅学,姚檀栋. 近 2000 年来古里雅冰芯记录及 19—20 世纪的气候变暖[J]. 冰川冻土,2004,26(3).
- [4] 李述训. 气候持续变暖条件下青藏高原多年冻土热状况变化特征近似分析[A]. 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上)[C]. 兰州:甘肃文化出版社,1996.
- [5] 李述训,程国栋,郭东训. 气候持续变暖条件下青藏高原多年冻土热状况变化特征的数值模拟[J]. 中国科学(D 辑),1996,39(4).
- [6] 程国栋,等. 气候变化对中国积雪、冰川和冻土的影响评价[M]. 兰州:甘肃文化出版社,1997.
- [7] 姚檀栋,等. 青藏高原中部冰冻圈动态特征[M]. 北京:地质出版社,2002.
- [8] 金会军,李述训. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. 地理学报,2000,55(2).
- [9] 王绍令. 青藏高原冻土退化与冻土环境变化探讨[J]. 地球科学进展,1998,13(增刊).
- [10] 汪双杰,霍明,周文锦. 青藏公路多年冻土路基病害[J]. 公路,2004,(5).
- [11] 马巍,程国栋,吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究[J]. 冰川冻土,2002,24(5).

Environmental Evolution Along Qinghai-Tibet Highway and Measures of Environmental Protection

WANG Shuang-jie, ZHOU Wen-jin

(The First Highway Survey & Design Institute of China, Xi'an 710075, China)

Abstract: The permafrost conditions of Qinghai-Tibet Highway is going worse and worse after opening to traffic in the 1950s, especially after the construction of blacktop of the pavement in the 1970s to 1980s. On the basis of the environmental evolution rule along Qinghai-Tibet Highway, the analysis of the inner-relations of frozen soil conditions, ecological environment and foundation stabilization is carried out, the counter-measures for protection of frozen soil and ecological environment presented which is valuable for the design of environment protection and highway in permafrost region.

Key words: Qinghai-Tibet Highway; permafrost; environmental protection