

文章编号:1000-0240(2012)03-0505-07

气候变化情景下青藏高原多年冻土 活动层厚度变化预测

张中琼, 吴青柏*

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 在人类活动和气候变暖的共同影响下, 浅层多年冻土近地表和活动层的热状况会发生显著的变化, 从而对生态环境、水文、工程等产生较大的影响。以 A1B, A2, B1 气候变化情景模式为基础, 运用 Stefan 公式计算和预测了青藏高原多年冻土区活动层厚度的变化特征。结果表明: 以羌塘盆地为中心, 青藏高原多年冻土活动层厚度向其四周不断增加, 多年冻土活动层厚度随着气温升高而增加。A1B、A2 模式下活动层厚度变化大, 相对人类活动强度较小的 B1 模式活动层厚度变化较小。到 2050 年时, A1B 情景活动层厚度平均约为 3.07 m, 相对于 2010 年活动层厚度约增加 0.3~0.8 m; B1 情景活动层厚度增加 0.2~0.5 m; A2 情景增加 0.2~0.55 m。到 2099 年, A1B 情景活动层的平均厚度将约为 3.42 m; A2 情景将可达 3.53 m; B1 情景将可达 2.93 m。气候变暖将可能加深活动层, 百年后将大范围改变多年冻土的空间分布。

关键词: 青藏高原; 活动层; 气候变化; 多年冻土

中图分类号: P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

活动层是指地壳表层每年冬季冻结、暖季融化的岩土层, 当处于多年冻土之上并且有负的年平均温度称为季节融化层; 当处于在非冻土之上, 并具有正的年平均地温, 称为季节冻结层^[1]。冻土活动层厚度的季节变化主要依赖于气候, 同时与海拔、纬度、活动层岩性、含水特征、地中热流以及影响地面温度变化进程的地形特征和下垫面性质有关。活动层厚度的变化是地气交换的主要过程, 也是影响寒区生态环境最活跃的因素。活动层土体的冻结和融化过程中的水和冰相互转化以及水分迁移、水热传输过程的变化都会改变地—气—水热状况及输运特征。因此, 冻土区活动层厚度和水热动态变化过程影响着冻土区水文和生态系统的生物、物理及地球化学过程。同时, 随着活动层厚度的增加, 多年冻土中储藏的有机碳和温室气体将逐步释放到大气中, 进一步影响局域甚至全球气候变化。

据 IPCC 报告预测^[2], 全球的平均气温在 21 世纪中将以每 10 a 上升 0.3 °C 的速度增温, 高纬度和高海拔地区增温的幅度可能更大。因此, 近年来冻土地区活动层变化受到国内外学者的广泛关注, 多年冻土与活动层研究已被世界气候研究计划 (WCRP) 列入气候和冰冻圈 (CLIC) 计划的主要观测研究内容之一。20 世纪 90 年代初期开展了环北极多年冻土区活动层和近地表冻土变化的监测 (Circumpolar Active Layer Monitoring Network, CALM), 先后有 15 个国家和地区参与了这项研究。历史资料和 CALM 初步监测结果表明^[3-4]: 北美极地的活动层厚度有显著的年际变化, 但并无显著的长期趋势。俄罗斯北极地区 37 个台站 1959—1990 年间监测结果表明^[5]: 活动层厚度增大了约 22 cm。欧洲中高山区活动层监测表明^[6]: 在过去几十年里活动层厚度不断增加, 2003 年夏季的活动层厚度比几十年前增加了将近 20%。中国在青藏高原也开展了大量活动层的监测和研究工作, 但监

收稿日期: 2011-11-14; 修订日期: 2012-02-10

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 (2010CB951402); 中国科学院重要方向群项目 (KZCX2-YW-Q03-08) 项目

作者简介: 张中琼 (1984—), 女, 甘肃白银人, 2009 年毕业于吉林大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士研究生, 主要从事寒区环境与工程方面研究。E-mail: zhongqionghao@163.com

* 通讯作者: 吴青柏, E-mail: qbwu@lzb.ac.cn

测主要集中在青藏公路铁路沿线^[7-8]。近几十年来,青藏高原多年冻土活动层厚度发生显著的变化。1980年以来,青藏高原东部多年冻土活动层厚度平均以 $0.71 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度增加^[9-11]。

气候变化影响下活动层厚度变化预测和制图研究是冻土区生态环境、水文、工程以及碳循环的基础。因此,国内外开展了大量的研究。Nelson 等^[12]和 Shiklomanov 等^[13]用 Stefan 方法在阿拉斯加北部地区 Kuparuk 流域进行活动层高精度制图,计算过程中使用了冻结指数的方式来说明在气候变化情况下冻土活动层的变化。Stendel 等^[14]用修正的 Stefan 公式计算活动层厚度,结果表明到 21 世纪末,活动层厚度将增加 $30\% \sim 40\%$ 。计算数据的空间分辨率为 $2.5^\circ \sim 5^\circ$,没有考虑复杂的地形和植被类型对活动层厚度的影响。Klene^[15]考虑了研究区融化指数、土壤、水分和土地覆盖特征的热性能和地形,运用 Stefan 公式对北极城镇化地区活动层厚度空间变化特征进行计算,并发展成为活动层厚度的区域概率随机模型。Pang 等^[16]考虑植被土壤性质等对活动层厚度的影响,用 Kudryavtsev 公式计算了青藏高原多年冻土活动层厚度的变化,给出了青藏高原活动层厚度空间分布图。

本文主要开展气候变化下青藏高原多年冻土活动层厚度预测研究,主要依据 Stefan 公式对青藏高原多年冻土区活动层厚度进行预测,并将结果与现状条件下青藏公路沿线的实测数据进行对比,最后,讨论气候变化对活动层厚度以及多年冻土的影响。

1 青藏高原气候变化

政府间气候变化委员 IPCC 第四次评估报告 (IPCC AR4) 中基于 BCC-CM1 气候模式对中国大陆地区温度变化进行估计。BCC-CM1 气候模式针对中国大陆地区人口规模、社会发展水平、能源供应和技术发展的适应程度等分为 3 个框架水平即 A1B 情景、A2 情景、B1 情景。A1B 情景经济快速增长,气温预测表现出 21 世纪上半叶增加较快,随着人口减少,气温上升幅度减小; A2 情景以区域经济发展为主,气温持续上升; B1 情景是一种可持续的经济发展模式,气温上升速度较慢。气候变暖条件下,青藏高原气温在不同气候情景下以不同速率增加。A1B 情景下青藏高原平均气温增长速率为 $0.04 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$; A2 情景下青藏高原平均气温增长速率为 $0.052 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$; B1 情景下青藏高原平均气温增长速率为 $0.023 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$,其气温上升幅度小于 A1B 情景、A2 情景(图 1)。

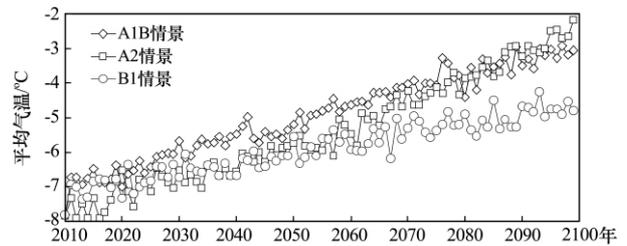


图 1 研究区 A1B、A2、B1 情景平均气温变化

Fig. 1 Projected changes in mean annual air temperatures under A1B, A2 and B1 scenarios in the plateau

2 活动层厚度的计算

对于空间上高度非均匀的冻土空间的变化,经验和半经验型的方法是一种较为实际的选择^[17]。活动层厚度计算方法中常用的有 Kudryavtsev 方法、Nelson 方法和 Stefan 方法。

Kudryavtsev 方法在温度的基础上,综合考虑了积雪、植被、土壤水分含量、土壤热性等因素对活动层的影响,把复杂的大气-冻土系统划分为单独的分量,并分别计算各层的热状况。该方法考虑较多的地表影响因子,计算出的冻结(融化)深度与观测值比较接近,二者误差较小,变化趋势也一致。但是在青藏高原某些测站中的个别年份与实际观测值的变化趋势相反^[17]。Stefan 方法假设地表吸热全部用于土中冰的融化耗热,其中没有考虑融土增温耗热及冻融界面传往下伏冻土的热量,导致计算结果偏大。其结果偏大是由岩性而异,徐敦祖等^[18]建议换用气温融化指数代替地表融化指数,并给出不同岩性的修正系数。Nelson 方法^[19-20]给出了冻土分布指数。采用最暖月和最冷月的气温资料根据土壤的热传导方程,推算出地面温度,结合 Stefan 公式,估算冻结(融化)深度。Nelson 方法的原理与 Stefan 方法基本一致。

青藏高原地区为典型的温带大陆性气候,年降水较少。高原上大多数区域积雪厚度较小,对活动层厚度影响较小。青藏高原地表主要覆盖物为不同类型的植被。青藏高原地形地貌条件复杂的,地势起伏较大,地质条件远比环北极地区复杂^[11, 21]。计算过程中如果参数过多,很难确定符合实际的计算参数。参数选取的不合理,会引起较大的计算误差。尽管 Stefan 方程存在一定的误差,但由于参数较少,在冻土活动层厚度研究中得到了广泛的应用。本文选择 Stefan 公式进行活动层厚度的计算。

2.1 计算方法与计算参数

运用基于融化指数的 Stefan 公式计算活动层

厚度, 如下式:

$$H = \sqrt{\frac{2\lambda n \overline{T_a} t}{L\gamma_{ck}(W - W_u)}} \quad (1)$$

式中: H 为活动层厚度(m); λ 为土的导热系数($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$); n 为 n 系数; $\overline{T_a}$ 为融化季节平均气温($^\circ C$); t 为融化季节持续时间; L 为冰融化的潜热, $3.3 \times 10^5 J \cdot kg^{-1}$; γ_{ck} 为土的干容重($kg \cdot m^{-3}$); W 为融化时土的总含水量(%); W_u 为冻土中的未冻水含量(%).

Stefan 公式计算活动层厚度主要涉及到土的导热系数、 n 系数、融化季节平均气温、融化季节持续时间、土的干容重、融化时土的总含水量、冻土中的未冻水含量, 这些参数主要包括三个方面: 气温参数、地表性质参数、冻土性质参数. 气温参数选用 IPCC 报告中月平均气温计算一年内暖季多年冻土的积温; 地表参数通过 n 系数来综合反映下垫面情况. 根据中国植被图编辑委员会编辑的《1:100 万中华人民共和国植被图》进行植被类型划分, 把研究区内划分为林地、草地和灌丛、草原、草甸、草原草甸混合区域、无植被区域. 选择青藏公路沿线相应植被类型下实测的 n 系数作为计算所需的 n 系数^[22-23], 即: 林地为 2.30、草地灌丛为 1.894、草原为 1.39、草甸及草原草甸混合区为 1.601、无植被区为 2.55. 冻土性质参数的选择与多年冻土的岩土性质密切相关. 本文主要依照《1:100 万中华人民共和国土壤图》数据库提供的标准剖面中砾、粗砂、细砂、粉砂、黏粒的百分含量, 结合土的工程分类标准(GB/T50145-2007)对研究区范围内的土壤重新进行工程分类. 分类结果表明青藏高原第四纪沉积物主要以砾、砂为主, 为粉质亚黏土、亚黏土、砂土、黏土. 根据土的类型和研究区部分实测数据确定各种土类的容重和含水量^[22-24]. 然后, 根据冻土工程地质勘察规范(GB50324-2001)附录 K 中冻土物理、力学参数确定相应物理性质下岩土的热参数. 本文选平均未冻水含量 5% 进行计算^[16].

表 1 给出了计算所需参数的数值.

表 1 不同岩土计算参数

Table 1 Geotechnical and geothermal parameters for various soils encountered on the plateau

参数	粉质亚黏土	亚黏土	黏土	砂土
$\gamma_{ck}/(kg \cdot m^{-3})$	1500	1300	900	1800
$W/\%$	17	15	15	6
$W_u/\%$	5	5	5	5
$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1.57	1.58	0.53	1.42

2.2 多年冻土分布范围确定

本文主要研究多年冻土区活动层厚度变化, 因此, 需将青藏高原的季节冻土和多年冻土进行划分. 研究表明: 年平均地温与海拔、纬度、经度具有较好的线性关系^[22, 25]. 因此, 本文运用青藏公路沿线的 190 组实测数据建立了年平均地温与海拔、纬度、经度的回归统计模型(公式 2). 在青藏高原数字高程模型(DEM)数据中提取数据点的海拔、纬度、经度数据, 建立数据的 $1 km \times 1 km$ 的栅格文件, 运用回归统计模型进行栅格计算, 得到现阶段青藏高原地区年平均地温的空间分布图. 以年平均地温 $0.5 ^\circ C$ 作为季节冻土和多年冻土的界限^[26], 如图 2 所示, 多年冻土主要分布在羌塘盆地地区, 祁连山区、喜马拉雅山地区、冈底斯山、念青唐古拉山地区有片状或岛状冻土分布.

$$T_{cp} = 62.05 - 0.11E - 0.74N - 0.006H \quad (2)$$

式中: T_{cp} 为年平均地温($^\circ C$); E 为经度($^\circ$); N 为纬度($^\circ$); H 为海拔(m).

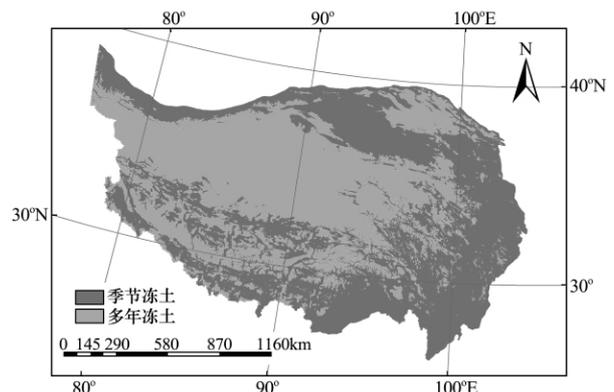


图 2 2010 年青藏高原冻土分布图

Fig. 2 Distribution of permafrost on the plateau, 2010

随着气温的升高, 年平均地温也会发生相应的变化, 学者研究表明^[27-28], 在一定的気温上升背景下, 地温在一定温度范围内按照一定比例增加. 在 $0.04 ^\circ C \cdot a^{-1}$ 速度变暖的条件下, 年平均地温 T_{cp} 大于 $0.5 ^\circ C$ 时, 在 25 a 内以 $0.02 ^\circ C \cdot a^{-1}$ 的速度上升, 当 $-4.5 ^\circ C < T_{cp} < -1.5 ^\circ C$ 时以 $0.017 ^\circ C \cdot a^{-1}$ 的速度上升, 即不同年平均地温条件在相同气温背景下的上升幅度不同. 以一定的年平均地温增加速率计算一定时间内的地温的上升 ΔT , 按照该方法计算不同气温增长速率下不同年平均地温的增长速率 ΔT . 以现状条件下地温数据为基础, 以式(2)中增加增温项 ΔT 计算各个数据点气温上升过程中的年平均地温上升, 得到 2030 年的年平均地温数据栅格文件, 用 2030 年不同情景下年平均地温数据计算 2050 年的地

温数据,依次计算 2075 年、2099 年不同气温情景下的年平均地温数据,并形成相应的栅格数据文件.依照年平均地温 $Q \leq 5^\circ\text{C}$ 划分季节冻土和多年冻土的范围.

2.3 活动层厚度的计算

运用 ArcMAP 建立各个计算参数的数据文件,将数据文件划分为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的栅格.运用 Stefan 方程计算 2010 年现状条件下活动层厚度(图 3)

空间变化.在现状条件下,青藏高原羌塘盆地活动层厚度最小;以羌塘盆地为中心,向四周活动层厚度不断增加.祁连山区、西昆仑山南麓活动层厚度较大,该地区气候温暖干燥,植被发育情况中等.特别是祁连山山区矿产资源丰富,矿产资源开采等人类活动对冻土影响较大.该地区冬季放出的热量远小于夏季吸收的热量,多年冻土在剖面上表现出

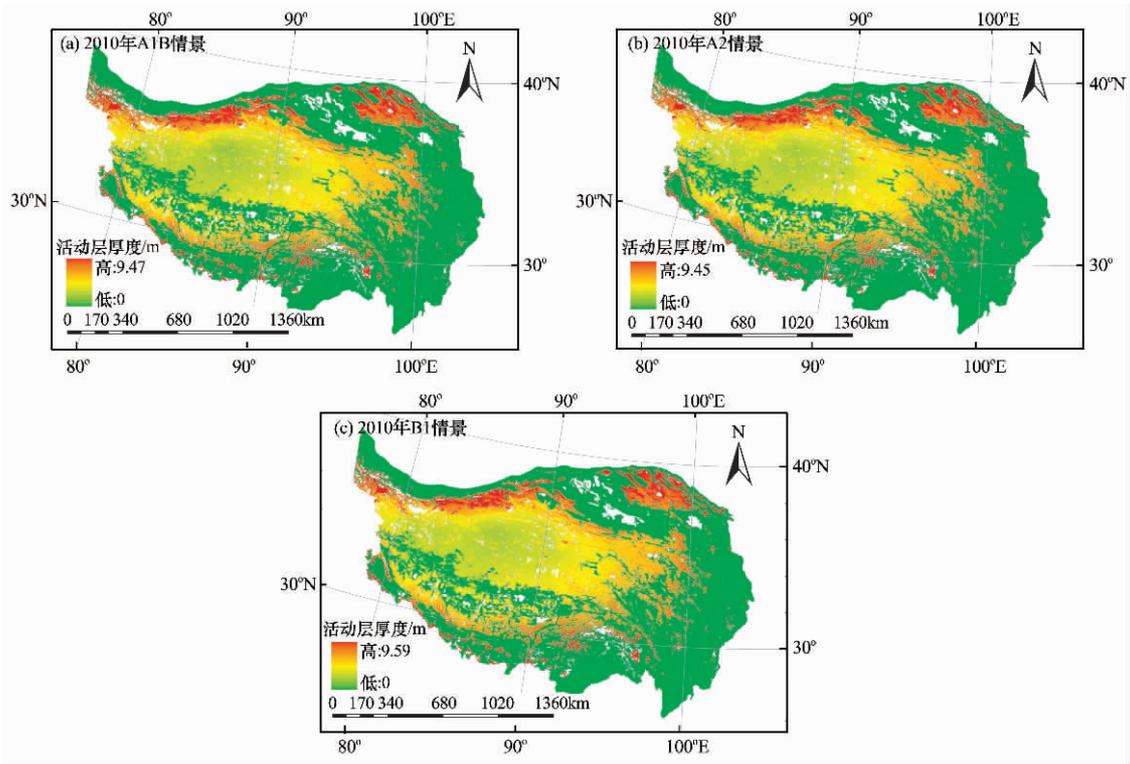


图 3 现状条件下活动层厚度

Fig. 3 Distribution of the simulated active layer thickness on the plateau at present

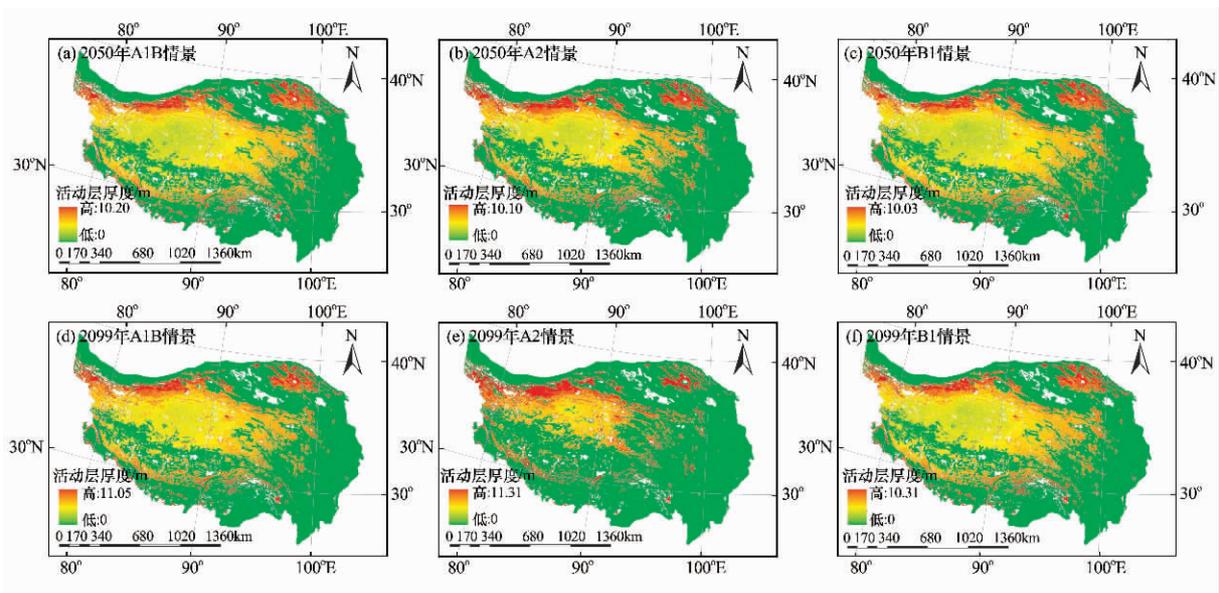


图 4 气候变暖条件下活动层厚度

Fig. 4 Predicted active layer thickness as climate warming

表 2 青藏公路沿线活动层厚度计算值与实测值对比

Table 2 Calculated and measured active layer thickness at some sites along the Qinghai-Tibet Highway

	纬度 /N	经度 /E	海拔 /m	地点	计算的 2010 年活动层厚度值/m			实测值范围 /m
					A1B 情景	A2 情景	B1 情景	
1	35.63°	94.07°	4770	昆仑山	2.17	2.16	2.22	1.8~2.8
2	35.62°	94.07°	4759	昆仑山	2.17	2.16	2.22	1.8~2.8
3	35.51°	93.73°	4552	楚玛尔河	2.07	2.07	2.12	1.8~3.2
4	35.40°	93.53°	4482	楚玛尔河	2.14	2.14	2.19	1.8~3.2
5	35.23°	93.09°	4610	五道梁	1.87	1.88	1.91	2.0~3.5
6	35.13°	93.04°	4707	五道梁	2.36	2.38	2.41	2.0~3.5
7	34.69°	92.89°	4938	风火山	1.82	1.86	1.88	1.3~2.5
8	32.71°	91.87°	4997	唐古拉山	1.91	1.93	1.99	1.5~2.5

不连续, 逐年增温使得活动层厚度不断加深, 直至多年冻土完全退化. 羌塘盆地活动层厚度约为 0.87~1.78 m, 平均值为 1.02 m. 冈底斯山、念青唐古拉山、喜马拉雅山冻土的形成与海拔密切相关, 随着海拔高度的增加活动层厚度逐渐减小, 活动层厚度约为 1.15~4.98 m, 平均值为 2.61 m. 西昆仑山地区活动层厚度约 3.29~5.96 m, 平均值为 4.54 m, 祁连山区活动层厚度约 2.7~4.98 m, 平均值为 3.86 m. 3 种模式不同人类活动程度下, 活动层厚度变化差异不大.

将 2010 年活动层厚度计算结果与青藏高原青藏公路沿线实测结果表 2 进行对比, 五道梁 5 号点的计算值偏小, 与实测值相差 0.1~0.2 m, 其他计算值均在实测范围内. 因为计算时土性质参数均选择了青藏高原范围同种土的平均值, 岩土条件是不断变化的, 部分计算点参数的变异性使得计算结果出现了一些差异. 虽然计算结果有一些误差, 但计算结果基本可以反映活动层厚度的变化规律和平面分布情况.

2.4 活动层厚度的预测

为了进一步讨论气候变暖条件下多年冻土活动层的变化情况, 在此基础上, 采用 IPCC 报告中不同气候情景下得到的预测气温, 预测未来 90 a 青藏高原活动层厚度在不同气温上升条件下的变化情况. 预测的结果如图 4 所示.

青藏高原以高原低山丘陵为主, 间有宽阔的盆地和谷底, 地貌上属高原湖盆区, 湖泊星罗棋布. 其中羌塘盆地区域为大片连续多年冻土区, 该区年平均气温较低, 活动层厚度较小, 在气温不断上升的条件下活动层厚度依然是整个青藏高原最薄的区域. 西昆仑山地区、祁连山地区依旧是青藏高原活动层厚度最大的区域, 气温的上升加剧了该地区多年冻土剖面上的不连续. 以羌塘盆地为中心, 向四周活动层厚度不断增加. 气温上升并未改变大范围青藏高

原活动层在空间上的分布特征, 可见冻土的退化是受青藏高原地形制约的. 到 2050 年时, A1B 情景活动层厚度最大达 10.2 m, 平均约为 3.07 m, 相对于 2010 年活动层厚度约增加约 0.3~0.8 m; B1 情景在这期间活动层厚度增加 0.2~0.5 m, A2 情景增加 0.2~0.55 m. 到 2099 年, A1B 情景活动层厚度最大达 11.05 m, 平均约为 3.42 m, 相对于 2010 年增加了 0.7~1.4 m, A2 模式活动层厚度最大达 11.31 m, 平均约为 3.53 m, 增幅约 0.8~1.5 m; B1 模式活动层厚度最薄, 平均约为 2.93 m, 增幅约 0.3~0.9 m, 这与气温上升情况一致. 在未来 40 a 内冻土面积未表现出大面积的减少, 仅在多年冻土边缘区域发生消退. 青藏高原多年冻土区的冻土退化主要表现为低温多年冻土转化为高温多年冻土, 活动层厚度增加, 多年冻土厚度减薄. 百年后青藏高原多年冻土将发生显著变化.

3 结论与讨论

外界环境的变化对冻土的存在状况有很大的影响, 活动层是冻土与外界交流的载体. 通过对未来不同模式下活动层厚度变化的计算, 得出以下结论:

(1) 分析所得数据并对数据的有效性进行判别, 使用 Stefan 公式计算青藏高原的活动层厚度, 计算结果表明: 以羌塘盆地为中心, 向四周青藏高原多年冻土活动层厚度不断增加, 祁连山山区、西昆仑山、念青唐古拉山、喜马拉雅山活动层厚度较大. 计算结果基本可以反映青藏高原多年冻土区活动层的变化规律.

(2) 通过 IPCC 报告对未来温度的变化数据, 计算在未来几十年内活动层厚度的变化. 在不同气候变化条件下, 多年冻土响应不同. 2050 年 A1B 模式活动层厚度相对于 2010 年增加了 0.3~0.8 m, 相对人类活动强度较小的 B1 模式也增加了约

0.2~0.5 m. 到 2099 年, A1B 情景模式下增加了 0.7~1.4 m, B1 模式增加了 0.3~0.9 m.

(3) 气候变化增加了活动层厚度, 但是并未改变活动层厚度的空间分布特征. 多年冻土的变化主要表现为低温冻土向高温冻土转化. 百年后青藏高原多年冻土将发生显著变化.

Stefan 公式计算活动层厚度以一维热传导方程为理论基础, 假设地面吸收的热量全部用于多年冻土的融化, 且融区内温度变化是线性的. 事实上冻土热量的传递收到诸多因素的控制^[29], 理论的假设给计算结果带来一定的误差. 虽然如此, Stefan 公式依然是活动层厚度计算运用最广泛、使用最方便的公式之一. 研究区内冻土层性质各异, 在选择参数时, 依照一层同性选取, 造成计算结果有一些偏颇. 在下一步工作中, 可将活动层范围内的土体进行分层, 将结合野外工作的实测数据, 将给出较为准确的结果.

气候变化影响活动层厚度的变化. 活动层厚度变化引起多年冻土的融化, 影响植被的分布和生长, 引起活动层内部水热重分布. 增加了活动层土壤含水量, 改变了土层物理性质, 影响大气与冻土之间的能量交换和水力传导. 气候变化条件下多年冻土活动层变化还需进一步研究.

参考文献 (References):

- [1] Qiu Guoqing, Liu Jingren, Liu Hongxu. Geocryological Glossary[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1994: 164-165. [邱国庆, 刘经仁, 刘鸿绪. 冻土学词典[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1994: 164-165.]
- [2] IPCC. IPCC Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Scientific-technical Analyses, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 1-56.
- [3] Brown J, Hinkel K M, Nelson F E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research design and initial results[J]. Polar Geogr., 2000, 24(3): 165-253.
- [4] Nelson F E, Shiklomanov N I, Hinkel K M, et al. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) workshop and the CALM II program [J]. Polar Geogr., 2004, 28: 253-266.
- [5] Frauenfeld O W, Zhang T J, Barry R G, et al. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, D05101, doi: 10.1029/2003JD004245.
- [6] Harris C, Vonder Muhl D, Isaksen K, et al. Warming permafrost in European mountains [J]. Global Planetary Change, 2003, 39: 215-225.
- [7] Yang Chengsong, Cheng Guodong. Probabilistic prediction of the impacts of climate change on permafrost stability along the Qinghai-Tibet Railway (I): Active layer thickness and ground temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 461-468. [杨成松, 程国栋. 气候变化条件下青藏铁路沿线多年冻土概率预报(I): 活动层厚度与地温[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 461-468.]
- [8] Yang Chengsong, Cheng Guodong. Probabilistic prediction of the impacts of climate change on permafrost stability along the Qinghai-Tibet Railway (II): Active layer thickness and settlement deformation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 469-478. [杨成松, 程国栋. 气候变化条件下青藏铁路沿线多年冻土概率预报(II): 活动层厚度与沉降变形[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 461-468.]
- [9] Zhao L, Ping C I, Yang D, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China[J]. Global Planetary Change, 2004, 43: 19-31.
- [10] Wang Qingchun, Li Lin, Li Dongliang, et al. Response of permafrost over Qinghai Plateau to climate warming[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(5): 708-713. [汪青春, 李林, 李栋梁, 等. 青海高原多年冻土对气候增暖的响应[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 708-713.]
- [11] Wu Qingbai, Zhang Tingjun. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, D09107, doi: 10.1029/2009JD012974.
- [12] Nelson F E, Shiklomanov N I, Mueller, G R, et al. Estimating active-layer thickness over a large region: Kuparuk River Basin, Alaska, USA[J]. Arct. Alp. Res., 1997, 29(4): 367-378.
- [13] Shiklomanov N I, Nelson F E. Active-layer mapping at regional scales: A 13-year spatial time series for the Kuparuk region, north-central Alaska [J]. Permafrost Periglacial Processes, 2002, 13: 219-230.
- [14] Stendel M, Christensen J H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29 (13): 1632, doi: 10.1029/2001GL014345.
- [15] Klene A E. Urbanization, Climate, and Frozen Ground in Barrow, Alaska[D]. Ph. D. Dissertation, Newark: Univ. of Del., 2005.
- [16] Pang Qiangqiang, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Active layer thickness calculation over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 57: 23-28.
- [17] Wang Chenghai, Jin Shuanglong, Wu Zhongyuan. Evaluation and application of the estimation methods of frozen(thawing) depth over China[J]. Advance in Earth Science, 2009, 24(2): 132-141. [王澄海, 靳双龙, 吴忠元. 估算冻结(融化)深度方法的比较及在中国地区的修正和应用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 132-141.]
- [18] Xu Xiaozu, Fu Liandi. Determine the maximum depth of seasonal thawing of permafrost based on the revised Stephen formula[C]//Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1983: 165-168. [徐教祖, 傅连弟. 根据修正的斯蒂芬公式确定多年冻土最大季节融化深度[C]//青藏冻土研究论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 165-168.]
- [19] Nelson F E, Outcalt S I. A frost index number for spatial prediction of ground-frost zones[C]//Permafrost—Fourth International Conference Proceedings, Vol. I. Washington DC: National Academy Press, 1983: 907-911.
- [20] Nelson F E, Anisimov O A, Shiklomanov N I. Climate

- change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions[J]. *Nature Hazards*, 2002, **26**: 203–225.
- [21] Li Yuanshou, Wang Genxu, Zhao Lin, *et al.* Response of soil moisture in the permafrost active layer to the change of alpine meadow coverage on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(1): 157–165. [李元寿, 王根绪, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土活动层土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2010 **32**(1): 157–165.]
- [22] Wu Qingbai. Study on Change of Frozen Soil Environment and Engineering Suitability under Human Activities[D]. PhD thesis, Lanzhou: Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2000: 129–131. [吴青柏. 人为活动下冻土环境变化和工程适应性研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2000: 129–131.]
- [23] Zhao Hongyan, Jiang Hao, Wang Keli. The Surface thawing-freezing indexes along the Qinghai-Tibet Railway: analysis and calculation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(4): 617–623. [赵红岩, 江灏, 王可丽. 青藏铁路沿线地表融冻指数的计算分析[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(4): 617–623.]
- [24] Nan Zhuotong. Study on Characteristics of Permafrost Distribution on the Qinghai-Tibet Plateau and Construction of Digital Roadbed of the Qinghai-Tibet Railway[D]. PhD thesis, Lanzhou: Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2003: 34–36. [南卓铜. 青藏高原冻土分布研究及青藏铁路数字路基建设[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2003: 34–36.]
- [25] Wu Qingbai, Li Xin, Li Wenjun. Computer simulation and mapping of the regional distribution of permafrost along the Qinghai-Xizang Highway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(4): 323–326. [吴青柏, 李新, 李文君. 青藏公路沿线冻土区域分布计算机模拟与制图[J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(4): 323–326.]
- [26] Cheng Guodong. Divided on the high-altitude permafrost in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, **4**(2): 1–17. [程国栋. 试论中国高海拔多年冻土带的划分[J]. *冰川冻土*, 1982, **4**(2): 1–17.]
- [27] Li Shuxun, Cheng Guodong, Guo Dongxin. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau, China, under climate warming[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, **39**(4): 434–441. [李述训, 程国栋, 郭东信. 气候持续变暖条件下青藏高原多年冻土变化趋势[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, **39**(4): 434–441.]
- [28] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong. Predicted the changes of permafrost in Qinghai-Tibet plateau under scenarios in the next 50 a and 100 a[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, **34**(6): 528–534. [南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50 与 100 a 青藏高原多年冻土变化情景预测[J]. *中国科学(D辑)*, 2005, **34**(6): 528–534.]
- [29] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, *et al.* Impact of surface energy variation on thawing processes within active layer of permafrost[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(6): 1235–1242. [李韧, 赵林, 丁永建, 等. 地表能量变化对多年冻土活动层融化过程的影响[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(6): 1235–1242.]

Predicting Changes of Active Layer Thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as Climate Warming

ZHANG Zhong-qiong, WU Qing-bai

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Thermal conditions of shallow permafrost and in the active layer will change significantly under the combined influence of human activities and climate warming. The change will inevitably impact ecological, hydrological and engineering environments. Adopting changes in the mean annual air temperature under the climate change Scenarios A1B, A2 and B1 as the baseline, the changes of the active layer thickness are predicted by the Stefan's Equation for the permafrost regions on the Tibetan Plateau in Southwest China. It is found that the active layer depth will increase radically outwards from the Qiangtang basin in the interior of the Tibetan Plateau with rising air temperature under the projected climate scenarios. Changes in

the active layer thickness under scenarios A1B and A2 will be more significant than that under scenario B1, because of lesser anthropogenic impacts. In 2050, the mean active layer thickness will reach 3.07 m under Scenario A1B, about 0.3~0.8 m more than that in 2010. At the same time, the increment will be 0.2~0.5 m under Scenario B1 and 0.2~0.55 m under scenario A2. In 2099, the mean active layer thickness will reach 3.42 m under scenario A1B, and 3.53 m under scenario A2. 2.93 m under scenario B1. Climate warming will significantly deepen the active layer. One hundred years later, the spatial distribution of permafrost will change largely.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; active layer thickness; climate change; permafrost