

※重要問題簡析※

從全球暖化對高原凍土的影響— 探討青藏鐵路的隱藏性危機

黃佩瑜
〔本會科員〕

摘 要

全球海拔最高、穿越凍土里程最長的高原鐵路—青藏鐵路，2006年7月1日才熱熱鬧鬧通車，但通行不到2個月就發生措那湖站「出軌」的意外事件，專家學者表示出軌原因疑似永凍土龜裂而導致路基鬆動，青藏鐵路全段中有超過960公里建在海拔4,000公尺的高原上，且約有550公里建築在凍土層上，中國官方研究人員擔心，凍土層可能因為全球暖化導致氣溫上升出現裂痕，影響列車行進。另有專家學者預料，鐵路建築於高海拔多年凍土地段，凍土層亦可能會被行進列車所產生的熱氣軟化，嚴重的話，可能引發路基下沉的危險¹，關於青藏鐵路的負面效應在中國政府的有心忽略與人為操縱下被隱藏，在頌揚青藏鐵路的正面效應時，大家不妨可持續關注及反思，為日後可能接續而來的衝擊做好準備。

關鍵詞：青藏鐵路、全球暖化、凍土層、
氣候變遷政府間專家委員會

壹、前言—青藏鐵路出軌事件

去(2006)年在青藏鐵路熱熱鬧鬧通車前，國內也有一條重大工程開通，即宜蘭和台北之間的雪山隧道開通，但這2項重大工程，大眾媒體

¹ 「青藏列車出軌故障！共4千多人受影響，幸無人傷亡」，東森新聞網
www.ettoday.com/2006/08/30/153-1984306.htm (2006.08.30)

對其報導面向實有天壤之別，在為時一周的新聞觀察期間，根據國內 6 家電視媒體²的報導統計，對於雪山隧道的相關新聞共有 140 則，其中報導角度的比例中負面有 52%，正面有 23%，另有中性報導 25%，相反的我們觀察同樣這 6 家電子媒體對青藏鐵路之報導，89 則中報導角度的比例負面只有 10%，正面卻高達 54%，另有中性報導 36%³。然而經過一年考驗，國內的雪山隧道除了假日某些時段出現小塞車外，並無任何重大公共意外或瑕疵產生，反觀中國青藏鐵路，在中國政府刻意宣傳下造成輿論偏頗，反而更容易因疏忽造成青藏鐵路公共安全產生問題，最明顯的例子就是青藏鐵路在通行不到 2 個月，發生措那湖站「出軌」的意外事件⁴，有專家學者表示出軌原因疑似永凍土龜裂而導致路基鬆動，由於青藏鐵路全段中有超過 960 公里建在海拔 4,000 公尺的高原上，且約有 550 公里建築在凍土層上，冬季溫度低到攝氏零下 35 度，夏季升到攝氏 30 多度，高低溫差大，因此凍土層是否會因為全球暖化加速融化，而影響青藏鐵路行車安全，引發筆者強烈的研究動機。

根據各國科學文獻及組織機構報告，全球暖化對世界各國的挑戰已經正式開始，透過各國媒體的報導，因全球暖化造成地球面貌的改變，也一一被揭露在世人面前，其中，目前已觀測到的變化有：冰川退縮、永凍土融化、河湖水面結冰時間延遲與河湖冰面提早融化等⁵。隨著美

² 包含年代新聞台、東森新聞台、中天新聞台、民視新聞台、三立新聞台及TVBS-N台 6 台之報導統計得知。

³ 「電子媒體報導雪山隧道及青藏鐵路相關新聞之研究」，廣電基金會媒體論壇
http://www.bdf.org.tw/forumDetail.php?ep_id=80 (2006.08.21)

⁴ 「2006 年 7 月 29 日一輛從重慶發車到拉薩 T23 次列車，行經拉薩東北部的措那湖站時，第 9 節突然出軌，造成單軌設計的青藏鐵路前後多達 6 班列車延誤，4 千多名乘客受到影響，火車停頓了 5 小時」，參考資料來源：「通車甫 2 月 青藏鐵路出軌」，自由電子報
<http://www.libertytimes.com.tw/2006/new/aug/31/today-int1.htm> (2006.08.31)

⁵ 「二氧化碳與地球暖化」，行政院國家科學委員會
http://www.nsc.gov.tw/_newfiles/popular_science_print.asp?add_year=2007&popsc_aid=61 (2007.05.21)

國第一位公開警告大眾全球暖化現象的科學家吉姆·漢森（Jim Hansen）近日在《衛報》（The Guardian）公開表示：「全球暖化（Global Warming）將進入失控局面，如果人類不致力於減少二氧化碳排放，並繼續燃燒完所有地底的化石燃料，地球將永遠改變。」⁶「氣候變遷政府間專家委員會」（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）⁷針對全球暖化現象，在 1990 年至 2007 年之間提出 4 次全球氣候變遷評估報告，其中今（2007）年 5 月 4 日提出之氣候變遷第 4 次報告第 3 卷（Mitigation of Climate Change：Volume 3 of its Fourth Assessment Report）中強烈警告各國不能再忽視全球暖化現象，並用相當「明確」、「堅決」的語氣表達全球暖化已是進行中的環境變化趨勢。

另外，2006 年 10 月 28 日英國首相布萊爾（Tony Blair），特別向全球媒體介紹英國政府首席經濟學家史登（Nicholas Stern）所撰寫長達 700 頁的《氣候變遷經濟評估》（Stern Review on the Economics of Climate Change：Stern Review）⁸。該報告指出，如果各國在未來 10 年內繼續忽視氣候暖化現象，人類將為其付出的代價，遠超過第 1 次、第 2 次世界大戰或 1930 年代的經濟大恐慌⁹。透過種種跡象顯示，全球暖

⁶ 「全球暖化與聖嬰現象，世界最炙熱的 2007 年」，破報 <http://pots.tw/node/500> (2007.01.04)

⁷ 「IPCC的作用是在全面、客觀、公開和透明的基礎上，評估與理解人為引起的氣候變化、提供氣氛變化的潛在影響以及適應和減緩的方案，並運用科學基礎發展相關科技及提出其對社會經濟影響的資訊。IPCC既不從事研究也不監測與氣候有關的資料或其他相關參數。它的評估主要基於經過細審和已出版的科學/技術文獻。IPCC的一項主要活動是定期對氣候變化的認知現狀進行評估。IPCC在認為有必要提供獨立的科學資訊和諮詢的情況下撰寫關於一些主題的“特別報告”和“技術報告”，並其有關《國家溫室氣體清單》方法的工作，為《聯合國氣候變化公約》（UNFCCC）提供支援。」IPCC <http://www.ipcc.ch/languageportal/chineseportal.htm#21>

⁸ 「全球暖化，燒掉你的錢」，商業周刊第 1013 期

⁹ 「英國報告：人類將為全球暖化後果付出天價」，奇摩新聞 <http://tw.news.yahoo.com/article/url/d/a/061029/19/5tr7.html> (2006.10.29)

化已成為一個不爭之事實，因此，筆者將經由瞭解全球暖化的成因、影響和現況，探討因全球暖化造成凍土層的融化及消失，對未來青藏鐵路行車安全可能產生之影響。

貳、全球暖化的成因及現況

一、全球暖化的產生原因

全球暖化成因與溫室效應（Greenhouse Effect）息息相關，因此先簡略介紹溫室效應。本來地球的溫室效應是十分重要，當太陽把熱能射向地球，地球表面會將太陽的熱力反射回外太空。不過，同時大氣中部分氣體，會截留部分熱力，令地球表面溫暖起來，這種現象稱為溫室效應¹⁰。如果沒有這種天然的溫室效應，地球的溫度便會降至攝氏零下 18 度，不適合人類居住¹¹。地球表面能量主要來自於太陽之輻射，屬於短波之入射波，經大氣吸收、地表及大氣反射後，僅剩約 49% 為地表所吸收，此經地表土壤、水體、植物等吸收後之能量，復以長波輻射方式釋出，一部分為對流層水氣（H₂O）及二氧化碳（CO₂）吸收，一部分在平流層為甲烷（CH₄）、氧化亞氮（又稱笑氣，N₂O）、氟氯碳化物（CFCs）等所吸收，其餘則逸入太空¹²。

工業革命以來，由於人類大量使用化石燃料（包括：煤、石油、天然氣等）及濫伐森林、使用含氯、氟之碳化物及頻繁之農工活動等，造

¹⁰ 「The Basics of Global Warming」，Environment Defense
<http://www.fightglobalwarming.com/page.cfm?tagID=273>

¹¹ 「全球氣候變化沒有國家可倖免」，環境資訊中心 <http://e-info.org.tw/node/21964> (2007.05.01)

¹² 「Greenhouse Gases and Where They Come From」，World Resources Institute
<http://earthtrends.wri.org/updates/node/103> (2006.11.08)

成「溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG)¹³」(表一)大幅增加。普林斯頓大學 (Princeton University) 研究如何降低二氧化碳濃度的專家羅伯特·索克洛 (Robert Socolow)，在 2005 年所提出的研究報告中表示：「當莎士比亞 (William Shakespeare) 吸氣時，每一百萬個微小粒子中有 280 個是二氧化碳，而現在我們一口氣中會吸進 380 個二氧化碳粒子，並以每年多兩顆的速度增加之中¹⁴。」可見得二氧化碳增加速度之快，當這些氣體吸收從地球排放到太空中的熱輻射，導致地球不僅無法將熱輻射排出，還得繼續接收來自太陽的熱能，因而造成地球溫度不斷地上升，當溫室效應開始大幅增加，繼而產生的即是「全球暖化」的現象。

二、全球暖化的現況簡述

(一) IPCC 最新研究報告內容

由聯合國環境規劃署 (United Nations Environment Programme: UNEP) 及世界氣象組織 (World Meteorological Organization: WMO) 在 1988 年成立的「氣候變遷政府間專家委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)，在今 (2007) 年 2 月 2 日、4 月 6 日及 5 月 4 日分別提出第四次評估報告第 1 至 3 卷¹⁵，第 1

¹³ 「在 1997 年於日本京都召開的聯合國氣候化綱要公約(United Nations of Convention on Climate Change, UNFCCC)第三次締約國大會中所通過的[京都議定書](Kyoto Protocol)，明訂針對六種溫室氣體進行削減，包括上述所提及之：二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、全氟碳化物及六氟化硫」，參考資料「今年冬天冷不冷？—全球暖化之省思」，財團法人國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心 <http://policy.stpi.org.tw/eip/focus/1167108499850/htm/ch/9512focus-2.htm>

¹⁴ 「Stabilization Wedges: Mitigation Tools for the Next Half-Century」，Robert Socolow <http://www.stabilisation2005.com/day3/Socolow.pdf> (2005.02.03)

¹⁵ 第一卷請參考「Climate Change 2007: The Physical Science Basis」，IPCC <http://www.ipcc.ch/activity/wg1outlines.pdf>
第二卷請參考「Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability」，IPCC <http://www.ipcc.ch/activity/wg2outlines.pdf>

卷的研究報告直言不諱地指出即使由現在開始控制大氣層中二氧化碳的濃度，全球暖化的現象仍不會馬上消失，會維持好幾個世紀，並估測全球平均氣溫將在本世紀結束前增加攝氏1.4至5.8度，報告內容根據100多個國家2,500多名科學家依據對大氣層、海洋、冰川等因素6年來的研究報告綜合分析而得，IPCC氣候變遷小組堅信，人類活動「可能」導致氣候變暖此證據的正確性¹⁶，遠高於該小組2001年發表第3次評估報告時的信心水準，這種「可能」在2001年時的信心水準為「在66%至90%之間」，但在2007年這種「可能」的信心已經上升到90%¹⁷，IPCC稱「very likely」為人為活動所造成。

在比利時（Belgian）首都布魯塞爾（Brussels）公布第2卷研究報告則預測全球暖化的嚴重後果，長達1400頁的報告表示：「專家普遍認為，氣候變遷很可能導致許多物種滅絕，並降低生態的多樣化。」根據報告的極端預測，「全球暖化最嚴重可能讓全球五分之一以上的人口受到水災影響」並有「11到32億的人口缺水」，澳洲科學家研究，亞太地區海平面在2030年上升16公分，2070年將上升50公分¹⁸。在泰國曼谷（Bangkok）公布的最後一份報告，再次說明全球暖化所造成的影響及衝擊，包括：極地冰原融化、衝擊水土資源、環境衛生及人類生命、沙漠化現象擴大、生態體系改變、區域氣候變化等。該

第三卷請參考「Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change」，IPCC
<http://www.ipcc.ch/activity/wg3outlines.pdf>

¹⁶ 「IPCC第四次第二工作組評估報告（IPCC AR4 WG2）」，工研院能環所永續策略研究室
<http://sd.erl.itri.org.tw/fccc/ch/pub/nsletter/e-paper/9604.htm>

¹⁷ 參考「聯合國權威報告：人類導致全球暖化證據確鑿」，環境資訊中心
<http://e-info.org.tw/node/19423> (2007.02.05) 及「IPCC Releases Comprehensive Assessment of Global Climate Change」，World Resources Institute <http://earthtrends.wri.org/updates/node/154> (2007.02.02)

¹⁸ 「社論—面對全球暖化世紀大挑戰」，台灣新生報
<http://www.tssdnews.com.tw/daily/2007/04/05/text/960405f2.htm> (2007.04.05)

報告並總結過去數年，各方面的專家和政府部門應對全球氣候變化的減緩措施、減少溫室氣體排放方法，例如：行政管制（command control）、課徵碳稅（Carbon Tax）及建立碳交易市場（Carbon Market）¹⁹等，污染者可以在碳市場交換污染許可²⁰。建議應大幅提高能源效益及增加可再生能源利用，並強調「制訂碳的價格」，將成本轉嫁給生產者與消費者，透過持續徵收碳排放費用，鼓勵民眾更有效率的使用能源²¹，轉而使用更乾淨的能源。

（二）其他全球暖化之相關報告

另外，在2006年World Resources Institute²²組織蒐集國外著名科學文獻及組織機構報告，彙整後提出一篇文件警告人類，2006年天氣變化趨勢已經越來越明顯，天氣變化不再只是單純的指溫度的改變，它影響的範圍，還包括錯綜複雜的氣候、水文及生態系統²³，例如：北極圈的冰原融化造成對北極熊的生存威脅，從1980年以來北極冰原已經有20%融化消失，消失之面積等於一個德州、加州和蒙大拿州面積

¹⁹ 參考聯合新聞網 2007.05.04 「碳權交易 新興國家搶商機」報導，因「京都議定書」自 2005 年 2 月 16 日起生效，參與國必須將造成地球暖化的溫室氣體排放量降到 1990 年的排放標準，也就是減少 5% 的溫室氣體排放量。達到減低二氧化碳的方法便是透過購買二氧化碳排放的允許量來完成，二氧化碳排放交易市場因此成型。可以透過三種方式來購買二氧化碳可排放額度：一則透過金融交易市場購買，如：歐盟氣體排放交易結構計畫。一則可在「清潔發展機制（Clean Development Mechanism, CDM）」的架構下，購買 Non-Annex I 國家所執行的排放氣體減量計畫，三則可向執行「聯合執行計畫」的經濟體或國家購買，通常這些國家為前蘇聯國家或東歐等國。

²⁰ 「對抗全球暖化 聯合國氣候小組公布重大報告」，大紀元
<http://www.epochtimes.com/b5/7/5/4/n1700020.htm> (2007.05.04)

²¹ 「New IPCC Report Offers Strategies for Combating Climate Change」，World Resources Institute
<http://earthtrends.wri.org/updates/node/196> (2007.05.11)

²² 參考WRI網站「The World Resources Institute (WRI) 是一個環境評估智囊團，它的任務就是找尋可行的方式去保護地球及改善人們的生活」<http://www.wri.org/about/>

²³ 摘錄自「Climate Science 2006: Major new discoveries」，World Resources Institute
http://www.wri.org/climate/pubs_description.cfm?pid=4261

總合²⁴，科學家預估如果全球暖化狀況持續下去，2040年之前北極冰原在夏天將全部融化，造成依賴浮冰作為防衛、獵食及繁殖的北極熊將面臨極大的毀滅²⁵。另外，世界第一高山喜馬拉雅山（Himalaya）的冰川快速融化也是一個明顯的例子，喜馬拉雅山地區素有「亞洲水塔」²⁶之稱，一旦冰川急速融化將導致其內含之七大水系水平面的高度急速下降，水資源短缺，將可能影響亞洲百萬人生存的區域²⁷，由這些相關資料不難得知全球生態及地貌將發生巨大的改變。

（三）惡性循環—全球暖化造成凍土層融化、凍土層融化加速全球暖化

「新科學家」（New Scientist）雜誌刊登俄國托木斯克國立大學（Tomsk State University）的科學家基爾波丁（Sergei Kirpotin）和英國牛津大學（University of Oxford）科學家瑪肯德（Judith Marquand）的一項發現：西伯利亞（Siberian）西部一萬多年前形成、面積約一百萬平方公里的永凍土²⁸（Permafrost）最近開始融化，變成佈滿泥沼和淺湖的破碎地形。永凍土地區，乃是全世界最大的泥煤田所在地。這片泥煤田自從一萬一千年前冰河時期結束以來，就不斷在產生甲烷，

²⁴ 參考「Part 5 of 5: The Melting of the North Pole」，Environment defense
http://environmentaldefenseblogs.org/climate411/2007/05/10/melting_arctic/ (2007.05.10)

²⁵ 摘錄自「Melting Arctic Sea Ice Threatens Polar Bears」，World Resources Institute
<http://earthtrends.wri.org/updates/node/138> (2007.01.08)

²⁶ 「聚焦青藏鐵路：探秘青藏鐵路五大疑問」，新華網 <http://news.sina.com/102-000-101-101/2006-06-28/0402260771.html> (2006.06.28)

²⁷ 摘錄自「Scientists to Survey Melting Himalayan Glaciers」，World Resources Institute
<http://earthtrends.wri.org/updates/node/131> (2006.12.26)

²⁸ 參考資料「永凍土是指溫度連續兩年或多年低於0°C(32°F)而形成的永久凍結土壤，永凍土約占地球陸地面積的20%」，大英百科全書線上Britannica Online
<http://tw.britannica.com/MiniSite/Article/id00048815.html>

並以晶籠化合物 (clathrates) 的形態蓄積在土內，相當於全世界土壤中甲烷存量的四分之一²⁹。

英國氣象局 (Met Office) 科學家史蒂芬·西區 (Stephen Sitch) 表示，永凍土至少需要幾十年才會完全解凍，因此甲烷不會一下子逸入大氣，但就算這些甲烷以一百年的時間完全逸出，每年還是會把 7 億噸的碳送入大氣形成二氧化碳，導致全球暖化程度增加 10% 到 25%³⁰。根據阿姆斯特丹自由大學 (Vrije University Amsterdam) 凡惠斯特丹 (Dr. J. van Huissteden) 博士表示，甲烷的溫暖化潛勢 (global warming potential, GWP) 比二氧化碳還強。美國阿拉斯加大學 (University of Alaska Fairbanks, U.S.) 的凱蒂·沃爾特 (Katey Walter) 也指出，甲烷的溫暖化潛勢比二氧化碳還要大 23 倍³¹；另外，英國《自然》(Nature) 雜誌 2006 年 9 月刊登的研究報告指出，從已經解凍的永久凍土中釋放出來的甲烷氣體速度，是人們原先預計的 5 倍³²。

英國東安吉利亞大學 (University of East Anglia) 氣候研究小組資深科學家大衛·威納 (David Viner) 指出，當人類開始粗暴對待自然體系時，將招致難以抑遏的後果，這個問題非常嚴重，因為我們無法讓永凍土恢復舊觀，而凍土層釋出的甲烷對全球暖化的加乘效果更是難以估算，將形成一種惡性循環，2001 年 IPCC 公布的報告預測並未納

²⁹ 「西伯利亞凍土逐漸融化」，自由電子報 <http://www.libertytimes.com.tw/2005/new/aug/12/today-int3.htm> (2005.08.12)

³⁰ 「衛報週評：地球暖化已到臨界點」，破報 http://publish.pots.com.tw/Chinese/PotsWorld/2005/08/25/374_2potsw/index.html (2005.08.25)

³¹ 「永久凍土解凍破壞力堪憂」，人間福報 <http://www.merit-times.com.tw/list.asp?unid=25126> (2006.09.09)

³² 「溫室效應發酵，融冰效應加劇，海洋酸化」，台灣環境資訊協會 <http://www.earthday.org.tw/climate/climate3.htm> (2006.02.07)

入這些甲烷的排放，科學家警告，此一預測可能因永凍土的解凍而向上修正，對未來地球溫度的預測必須向上修正³³。

設立在波布爾德（Boulder）的美國「大氣研究國家中心」（National Center for Atmospheric Research, NCAR），以最新的氣候模型模擬變遷效應，結果顯示全球暖化融化地表的永凍土可達厚度 3 公尺以上。美國政府研究機構的警告說，在 2050 年以前，很可能有半數以上的永凍土覆蓋區融化；在 2100 年，甚至會有九成以上永凍土融化與流失。而青藏鐵路有約 550 公里是建築在凍土層上，將也會面臨這樣的危機。

卡內基學會全球生態研究負責人克里斯·菲爾德（Chris Field）表示：「氣溫越高，解凍的永久凍土就越多，釋放出大量甲烷和二氧化碳到達大氣層，通過溫室效應阻止地球上的熱量散發。而保留的熱量又導致更多的永久凍土解凍，如此惡性循環加劇的趨勢更為嚴重。」這種惡性循環已經開始，以阿拉斯加（Alaska）為例，阿拉斯加有 85% 的面積為永凍土，近期的暖化現象已使阿拉斯加中部大片區域的永凍土融解，由於土層中的冰融化，導致土塊崩解，造成道路彎曲鼓起、房屋地基動搖、以及大片樹林「東倒西歪」³⁴。這也就是當初中國規劃在凍土層上興建青藏鐵路，無論國內、外均有環保人士大力勸阻的原因之一。

參、青藏鐵路資料簡介

一、青藏鐵路建築時間：

³³ 同註 29。

³⁴ 「北極圈永凍土融化，恐進一步催化溫室效應」，環境資訊中心 <http://e-info.org.tw/node/1080> (2005.12.23)

青藏鐵路自青海省西寧市至西藏自治區拉薩市，全長 1,956 公里。青藏鐵路第 1 期工程早在 1958 年就已開工建設，第 1 期工程由西寧至格爾木段 814 公里，1979 年建成鋪通，1984 年 5 月 1 日，青藏鐵路一期工程（西寧至格爾木段）正式通車。第 2 期工程 2001 年 6 月 29 日開工建設，長 1,142 公里，其中新建 1,110 公里，格爾木至南山口既有線改造 32 公里，該段與青藏公路平行。青藏鐵路於 2006 年 7 月 1 日實現全線通車，總投資人民幣 330 億元青藏鐵路從醞釀到通車經歷 48 年³⁵。

二、青藏鐵路通過之地形

青藏鐵路穿越三江源、可可西里、羌塘草原三個國家級自然保護區，途經沙漠戈壁地帶和多年凍土地帶，沿線旅遊資源十分豐富，擁有的地貌景觀、水系景觀、生物景觀、人文景觀和民俗景觀等資源，並擁有世界聞名的雅魯藏布江大峽谷、喜馬拉雅山的雪山冰川及占全中國總數 35% 的各種珍貴稀有的野生保護動物等³⁶。

鐵路線路位於海拔 4,000 公尺以上的地段有 960 公里，佔線路總長的 84%，穿越多個無人區；工程經過長達 550 公里的連續多年凍土區，佔線路總長的 50%；線路經過的最高點海拔超過 5,000 公尺；當地氣候惡劣，雷暴、暴風雪、地震時有發生。此外，鐵路橫跨可可西里和唐古喇山無人區，大部分地區氧氣含量僅佔海平面的 50% 左右，極端氣溫可低達攝氏零下 40 度³⁷。

³⁵ 「青藏鐵路開通之際回眸建設歷程」，新華網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlisyx/2006-07/02/content_7407147.htm
(2006.07.02)

³⁶ 「青藏鐵路開通將為沿線旅遊發展帶來什麼？」，青藏鐵路網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlisyx/2006-06/14/content_7259299.htm
(2006.06.14)

³⁷ 「與藏人命運息息相關的青藏鐵路」，西藏之頁 <http://www.xizang-zhiye.org/b5/nl/57/index.html#6>
(2005.12.02)

三、青藏鐵路通過之凍土層特性

(一)凍土類型及特性

中國科學院蘭州分院院長、凍土專家程國棟表示，在北美將低於攝氏 0 度的土，不管是否含冰，均稱為凍土。凍土分類有許多說法，其中一種乃將凍土分為三類：第 1 類冬季凍結、夏季全部融化的岩土為季節凍土；第 2 類冬季凍結、僅在繼後的夏季不融化的岩土為隔年凍土；第 3 類凍結時間達 3 年或 3 年以上的岩土為多年凍土³⁸。

凍土是一個複雜的多相和多成分體系，至少由三態組成：1. 氣態，包括水汽和空氣。2. 固態，包括礦物顆粒和冰，根據岩土和冰的相互配置關係可分 3 種基本的構造：① 整體構造，冰粒均勻地分布於岩土孔隙或土粒接觸處；② 層狀構造，冰以夾層和透鏡體的形式與岩土層呈互層；③ 網狀構造，冰夾層和細冰脈組合成網狀。3. 液態，即未凍水。凍土中的未凍水隨負溫降低而減少。在通常的負溫下（至少可達攝氏零下 70 度）；凍土中總有一定數量的未凍水存在³⁹。

由於凍土中含有冰，因而它是一種對溫度極為敏感且性質不穩定的土體。凍土層凍結時體積增大，形成凍脹現象。凍土層融化時，形成融沉現象。凍土中含冰量越大，凍脹、融沉現象越嚴重。

(二)青藏鐵路通過之凍土層分類

青藏鐵路建築在青藏高原是屬於高海拔多年凍土區⁴⁰，為世界上中低緯度海拔最高、面積最大的多年凍土區⁴¹，位於季節融化層(或活

³⁸ 中國大百科全書—智慧藏 <http://163.24.155.45/newlib/cpedia/Content.asp?ID=74699>

³⁹ 同註 38。

⁴⁰ 參考「中國大百科全書—智慧藏」對多年凍土說明：當岩土的溫度降至 0°C 以下，岩土中水就凍結形成凍土。如果該處地表一年中的吸熱量大於散熱量，冷季形成的凍土在熱半年全部融化，便為季節凍土。如果該處地表一年中的吸熱量。小於散熱量，冷季形成的凍土在暖季不全部融化，年復一年，就成為多年凍土。

動層)下。活動層的厚度通常為 20 至 30 公分到 2 至 3 公尺不等。當 2001 年 6 月 29 日中國宣布青藏鐵路第 2 期工程格爾木到拉薩段正式開工時，工程設計仍先依據青藏高原凍土的溫度，將青藏鐵路沿線 550 公里的凍土區分為 4 個區塊。中國科學院凍土工程國家重點實驗室教授、青藏鐵路建設指揮部科技部張魯新部長表示，其中：地溫在攝氏 0 度到攝氏零下 0.5 度的稱為高溫極不穩定凍土區，在攝氏零下 0.5 度到攝氏零下 1 度之間的稱為高溫不穩定區，攝氏零下 1 度到攝氏零下 2 度之間的稱為低溫基本穩定區，攝氏零下 2 度以下的稱為低溫穩定區⁴²。因此，工程技術和建設人員能據此，對不同的凍土採取相應的工程措施。

(三)青藏高原凍土區與高緯度凍土區之區別

2006 年 6 月 28 日，新浪網刊登對中國科學院寒區旱區環境與工程研究所凍土工程國家重點實驗室副主任吳青柏之採訪，吳副主任提到國外大部分高原凍土區的溫度較低，而中國青藏高原凍土層厚度相當薄弱，溫度高，很多地區的年平均地溫高於攝氏零下 1 度⁴³。

另張魯新部長亦表示，世界各地的凍土本身的性質沒什麼不同，但由於各地凍土年均氣溫、地表植被等生存條件之不同，因此，世界各地的凍土發展過程也是不一樣的。凍土雖然在加拿大、俄羅斯等國家也存在，但他們是屬高緯度凍土，比較穩定。青藏鐵路緯度低，海

⁴¹ 參考「中國大百科全書—智慧藏」對高海拔多年凍土說明：多年凍土南界以南、一定海拔高度上出現的多年凍土稱為高海拔多年凍土。其分布有明顯的垂直帶性，厚度一般自多年凍土出現的最低界線(即多年凍土下界)往上，隨高度的遞增而增加。

⁴² 「攻克青藏鐵路第一難凍土」，青藏鐵路網 http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlw/2006-07/28/content_7639372.htm (2006.07.28)

⁴³ 「凍土問題專家吳青柏：青藏鐵路成功克服凍土難題」，新浪網 <http://news.sina.com/102-000-101-101/2006-06-28/0859260878.html> (2006.06.28)

拔高，日照強烈，太陽輻射對凍土有著非同尋常的影響。再加上青藏高原年輕，構造運動頻繁，在這裡的多年凍土具有地溫高、厚度薄、熱融發育等特點，其複雜性和獨特性舉世無雙⁴⁴。

(四)凍土層興建工程之困難

青藏高原是世界上面積最大、海拔最高的高原，地理位置獨特，自然環境惡劣，地質條件複雜，素有“世界屋脊”、“地球第三極”之稱。建築在青藏高原的青藏鐵路格拉段穿越多年凍土區，青藏鐵路成敗決定於路基，而路基最大的問題就是多年凍土；吳青柏副主任表示，從 20 世紀 60 年代起，高原地質勘探人員通過鑽孔研究青藏鐵路通過之凍土層地下的結構，但提取的岩芯心讓人心驚：地表是薄薄的草皮，往下 2 公尺的範圍就是凍結的砂礫土層，再往下便是混雜有泥土的冰塊，甚至是純冰塊⁴⁵。

在凍土層修築工程構築物時，會面臨兩大工程問題：凍脹（Frost heaving）和融沉（Freeze thaw action）。路基、橋涵、隧道等都會受到這兩大工程問題的困擾。從路基角度來講，影響路基穩定性的核心問題是多年凍土層年平均地溫分區，年平均地溫高於攝氏零下 1.5 度，若只採用的是墊高路基的方式，是不能保證路基穩定的，這由青藏公路工程可以瞭解，由 1990 年中國對青藏公路調查得知，當時出現路況問題的比率高達 31.7%；因此，必須採取綜合治理的方法才能解決該問題；而低於攝氏零下 1.5 度則可單純採用加高路基方法來保證路基穩定。另一個極為重要的核心問題是青藏鐵路地下冰空間分佈問

⁴⁴ 「青藏鐵路堪稱“世界凍土工程博物館”」，青藏鐵路網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlw/2006-06/16/content_7278470.htm
(2006.06.16)

⁴⁵ 同註 43。

題。青藏公路的長期研究和經驗顯示，地下冰是影響凍土路基穩定的重要的影響之一，將產生凍融災害或者不良凍土現象的問題⁴⁶。

因此凍土在寒季就像冰一樣凍結，隨著溫度的降低體積會發生膨脹，建在上面的路基和鋼軌就會被“發胖”的凍土頂得凸起；到了夏季，融化的凍土體積縮小，路基和鋼軌又會隨之凹下去。凍土的凍結和融化反覆交替地出現，路基就會翻漿、冒泥，鋼軌會出現波浪形高低起伏，對鐵路營運安全造成威脅⁴⁷。台灣大學地質系陳宏宇系主任表示：「如果鐵路建築在岩盤上，本來基礎應該是很堅固，但到了夏天以後水氣融化，造成它的強度會被弱化，鐵路在高速行走時，基礎不容許有任何的搖擺狀況，岩石強度不容許有任何的弱化狀況，不然極有可能會對行車安全產生影響。⁴⁸」因此凍土層嚴重凍脹、融沉病害，可能導致工程結構變形，使鐵路線路失去平順性，影響列車正常行駛⁴⁹。

肆、青藏高原凍土層退化隱藏的危機

2004年9月5日在中國蘭州召開的亞洲國際多年凍土會議上，國際凍土協會主席布朗表示：「隨著全球氣候變暖，凍土退化明顯，季節性凍土融化加快，融化沉陷在加深。」另由美國阿拉斯加北部凍土近100年來溫度升高攝氏3至7度，從20世紀80年代以來，升高了攝氏2至

⁴⁶ 「青藏鐵路建設中凍土工程結構穩定性研究」，青藏鐵路網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlw/2003-07/02/content_664267.htm
(2006.07.02)

⁴⁷ 同註46。

⁴⁸ 「走進香格里拉系列（三）：打破人類工程極限 打造世紀工程」，台灣之音
<http://www.rti.org.tw/news/NewsContentHome.aspx?NewsID=42802&t=5> (2003.08.28)

⁴⁹ 「雪域高原問天路」，大正資訊學習網 http://www.tiw.com.tw/show_content1.aspx?rowid=145@5

3 度。歐洲、加拿大、西伯利亞等地的凍土升高了攝氏 2 至 3 度，就連本身溫度很高的青藏高原多年凍土溫度也升高了攝氏 0.5 至 1.5 度。除了溫度升高外，多年凍土的退化還表現在活動層變化較大，特別是青藏高原，50 年來，凍土活動層增加了 1 公尺左右；西伯利亞高原凍土活動層則增加了 20 至 30 公分⁵⁰。同時，季節性凍土的變化更為顯著。中國在近 50 年來，凍土面積縮小了 10% 至 15%，整個北半球縮小了 7% 至 10%，大約為 300 萬至 400 萬平方公里⁵¹。

凍土的融化加劇凍土區域的地面不穩定性，並引發出更多的凍土區工程地質問題，不利於大型道路和工程的建設⁵²。除了在岡底斯山—念青唐古拉山以北、安獅公路南北面積分別為 30 多萬平方公里的區域內，其凍土幾十年來在持續退化，而該區域正是青藏鐵路的路經之地。目前，凍土退化已呈現出它的影響，由青藏公路的例子得知，前兩年雖中國政府投入人民幣十幾億元維修，但現在一些路面又出現坑坑窪窪，青藏鐵路格爾木至拉薩路段基本上與青藏公路並行⁵³，不難想見未來青藏鐵路也有可能遭逢相同之命運，中國中科院資深專家吳紫汪提出的擔憂：「對前不久已修建鋪通的青藏鐵路來說，我擔心在 10 年後它會因凍土退化出現安全問題。」

中國新京報引述中國鐵道部發言人王勇平的發言指出，青藏鐵路部分路段的基礎凍土層已經出現下沈爆裂的現象，使得車廂在部分路段行

⁵⁰ 「專家稱，全球凍土因氣候變暖而退化」，新華網
<http://big5.sinhuanet.com/gate/big5/news.xinhuanet.com/environment/2006-08/10/content> (2006.08.10)

⁵¹ 同註 40。

⁵² 「青藏鐵路 3 大災難」，新浪雜誌轉載時報週刊 <http://magazine.sina.com.tw/chinatimesweekly/1479/2006-06-27/ba12452.shtml> (2006.06.27)

⁵³ 「認識青藏鐵路：積極作用與不利影響並存」，香港獨立媒體
http://www.inmediahk.net/public/article?item_id=127755&group_id=35 (2006.06.09)

車不穩，其部分混凝土結構和橋樑也出現裂縫狀況，將可能造成行車安全隱憂⁵⁴。氣象專家在 2005 年曾經提出警告，全球氣溫持續升高，可能使青藏鐵路凍土層逐漸融化，但當時並沒有提到凍土層會下沉或爆裂的問題。另外更有中國科學院專家學者表示，青藏高原的凍土層正在加速退融，可能在 10 年後對目前已全線鋪通的青藏鐵路構成威脅。吳紫汪專家提出其近 30 年來對青藏高原之觀察，其凍土出現凍結持續天數縮短、最大凍土深度減小等現象⁵⁵，而這些現象是興建青藏鐵路，無法預測的巨大轉變。

另有環境保護者對中國處理凍土層的方法表示不滿。因為西藏已是受全球變暖影響最明顯的地區之一，2006 年國際綠色和平組織（Greenpeace International）⁵⁶的報告內容明顯描述青藏高原永凍土層融化帶來的後果，除了房屋牆壁出現很深的裂縫，通往西藏的 214 號國道由於土層裂開，汽車在起伏不平的公路上「跳舞」，中國政府每 3 年就要大修一次。這種全球氣候演化造成的自然災害似乎是人力所無法抗拒的⁵⁷。就如同中國鐵道建築總公司總經理特助林蘭生先生所表示：「從某種意義上來講，人類認識自然的過程是有限的。⁵⁸」因此，新建的青藏鐵路日後將面臨的是更嚴峻且無可避免的環境改變。

⁵⁴ 「通車不到一個月，青藏鐵路混凝土結構爆裂」，奇摩新聞轉載中國新京報報導 <http://tw.news.yahoo.com/article/url/d/a/060728/19/1akt.html> (2006.07.28)

⁵⁵ 「專家稱凍土層退，10 年後可能威脅青藏鐵路安全」，新華網 <http://news.sina.com/102-000-101-101/2006-01-21/0244198326.html> (2007.01.21)

⁵⁶ 國際綠色組織網站說明該組織「綠色和平是一個全球性的環保組織，致力於以實際行動推動積極的改變，保護地球環境與世界和平。綠色和平成立於 1971 年，目前在世界 40 多個國家和地區設有分部，擁有超過 280 萬名支持者。」，<http://www.greenpeace.org/china/ch/about>

⁵⁷ 「與藏人命運息息相關的青藏鐵路」，西藏通訊 <http://www.xizang-zhiye.org/b5/nl/57/index.html#6> (2006.12.02)

⁵⁸ 同註 48。

伍、青藏鐵路建築工程設計可否防止全球暖化帶來的影響

一、青藏鐵路建築工程設計前期作業

中國科學家從 20 世紀 60 年代初開始，在青藏高原海拔 4,800 多公尺的地方，建立了凍土科研基地—風火山觀測站，40 餘年來積累了一千二百多萬個數據以供興建青藏鐵路時參考使用⁵⁹。在決定興建工程時，就對沿線自然保護區、生物多樣性和多年凍土環境狀況進行了 8 次大規模現場調查研究、踏勘和採樣⁶⁰，多年凍土區工程一般採取保護凍土、控制融化速率和允許融化三種設計原則，青藏鐵路試驗工程基本考慮了上述三種設計原則。

因此，中國鐵道部在興建青藏鐵路時，以主動降溫、減少傳入地基熱量、保證多年凍土的熱穩定性⁶¹為原則，根據不同的工程地質條件，興建工程應根據不同情況，採取相應的不同設計原則：在年平均地溫較低的穩定型多年凍土區應採取保持地基凍結狀態的設計原則；在年平均地溫較高、含冰量較少，採用施工及營運期允許融化的原則；在極不穩定的凍土地段，採用鋪設保溫層、通風路基、清除富冰凍土、熱棒(樁)及以橋代路等綜合技術措施；在不融沉或弱融沉的少冰凍土或多冰凍土地區，採取不考慮建築物熱力影響的常規設計方法。

⁵⁹ 同註 42。

⁶⁰ 「尊重科學科技環保」，科報網—經濟特刊 http://www.stdaily.com/big5/economy/2005-08/21/content_424386.htm
(2005.08.21)

⁶¹ 「為什麼凍土成為世界性技術難題？」，青藏鐵路網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlw/2006-07/28/content_7639393.htm
(2006.07.28)

二、青藏鐵路建築工程設計簡述

在青藏鐵路凍土工程上，目前有多種解決的辦法與技術，(一)適當提高路基填土高度，用天然土保溫，這種方法價廉，可普遍採用。(二)在路基埋設工業保溫層（PU、EPS等），埋設 5 至 10 釐米保溫板，在工程經驗中均取得極佳工程效果。(三)埋設通風管，就是在路堤中埋設直徑 30 釐米左右的金屬或混凝土橫向通風管，可以有效降低路基溫度。(四)採用拋石路基，即用碎石塊填築路基，利用填石路基的通風透氣性，阻隔熱空氣下移，同時吸入冷氣，達到保護凍土的作用。(五)在少數極不穩定凍土地段修建低架旱橋，對工程效果有保證，但造價頗高。青藏高原溫度對凍土的影響非常大，一般情況地面溫度比氣溫高攝氏 3 至 4 度，沒有太陽的直接照射，設置保溫層地基或者通風地基可降低原地面溫度攝氏 2 至 3 度，而修築這樣的保溫地基和通風地基，每公里增加的造價為人民幣 60 至 200 多萬元⁶²。

全球氣候變暖會影響凍土的深度（凍土上限）為減緩凍土層融化，青藏鐵路施工主要採取了以下措施：在地質複雜地段，路線盡量繞避；在不穩定凍土區的高含冰量地質，則採取“以橋代路”的辦法；並採用通風路堤、片石通風路基、熱棒（樁）、鋪設保溫層等方式，保持凍土區的溫度，防止凍土融凍速度過快，提高凍土區路基的穩定性⁶³，從而保證鐵路工程安全，詳述如下⁶⁴：

⁶² 「青藏鐵路的凍土問題」，青藏鐵路網
<http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlw/dtsysj.htm> (2006.07.02)

⁶³ 「青鐵破解凍土技術難題，時速有望達 100 公里」，青藏鐵路網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlw/2006-07/28/content_7639377.htm
(2006,7,28)

⁶⁴ 彙整青藏鐵路網「攻克青藏鐵路第一難凍土」、「青藏鐵路的凍土問題」、「青藏鐵路開通之際回眸建設歷程」、「青藏鐵路建設中凍土工程結構穩定性研究」等文章。

1. 片石通風路基：青藏鐵路有 111 公里路線鋪有一種特殊的路基，在路基墊層之上，設置一定厚度和空隙度的片石層，因片石層上下界面間存在溫度梯度，引起片石層內空氣的對流，熱交換作用以對流為主，利用高原凍土區負積溫值大於正積溫值的氣候特點，加快路基基底地層的散熱，取得降低地溫、保護凍土的效果，是效果較佳的保護凍土措施，好似散熱排風扇，冬季從路堤及地基中排除熱量，夏季較少吸收熱量，達到冷卻作用，能降低地基溫度攝氏 0.5 度以上。
2. 以橋代路：全長 11.7 公里的青藏鐵路清水河特大橋橫架在可可西里凍土區，是一種“以橋代路”的保護凍土措施，鐵軌飛架而過可以不驚擾凍土，青藏鐵路“以橋代路”橋梁共達 156.7 公里，佔多年凍土地段的四分之一。
3. 熱棒：青藏鐵路有些凍土路基兩旁插有一排排直徑約 15 釐米、高約 2 公尺的鐵棒，這就是熱棒。它是一種高效熱導裝置，具有獨特的單向傳熱性能：熱量只能從地面下端向地面上端傳輸，反向不能傳熱，可以說是一種不需動力的天然製冷機。大規模使用熱棒可以保持多年凍土處於良好凍結狀態。熱棒在路基下埋有 5 公尺，整個棒體是中空的，裡面灌有液態氮。其原理很簡單，當大氣溫度低於路基內部，受外界影響熱棒內部溫度上升時，液態氮受熱發生氣化，氣化的氮上升到熱棒的上端，通過散熱片將熱量傳導給空氣，氣態氮由此冷卻變成了液態氮，靠重力作用又沉入了棒底。
4. 通風管措施。在路基內橫向埋設水平通風管，冬季冷空氣在管內對流，加強了路基填土的散熱，有利於降低基底地溫，提高凍土的穩定性。通風管則是水平插入路基裡。路基受外界影響溫度發生變化，而

通風管利用對流原理即時將這些熱量進行交換，保證了凍土的熱穩定性。

三、青藏鐵路建築工程設計是否「真的」可以防止全球暖化帶來的影響

全球氣候變化的趨勢分析，預估在未來 50 年後青藏高原的溫度有可能上升攝氏 2.2 度到 2.6 度。這對於中國僅僅以攝氏 0.5 度至 1 度為建築青藏鐵路工程設計，區分為 4 個凍土區域的建築工程，實在是一個潛在的巨大威脅⁶⁵。在氣溫不斷上升後，原本區分之高溫極不穩定、高溫不穩定區、低溫基本穩定區及低溫穩定之凍土區，都有可能變成高溫極不穩定區，而屆時針對各凍土區採取相應的工程措施，是否仍可符合各轉變後的凍土層特性嗎？挪威鐵路博物館（Flåmsbana museum）研究員漢斯·施爾弗（Hans Schaefer）表示：「這種凍土施工方法理論上可行，但從未實際應用過。是否切實可行，也只有時間可以證明了。⁶⁶」而時間最後將證明什麼，其實也不難猜想而知。

另外，吳青柏副主任表示：「青藏鐵路工程與凍土環境效應問題，考慮了全球氣候變暖的趨勢，在前期實驗中，溫度上升對路基的破壞我們作了大量的實驗。在 2003 年，也就是青藏鐵路已開工 2 年時候，我們根據實地監測，建設部門對一些敏感的凍土路段進行了規劃調整，很多地段增加了冷卻路基的裝置方法，有些地段甚至直接改成以橋代路的方案。可以這樣說，青藏高原今後氣溫如真的要上升攝氏 2 度，我們現在採取的冷卻技術是完全可以應對的。並且設計在鐵路沿線的凍土區設置

⁶⁵ 「攻克青藏鐵路第一難凍土」，青藏鐵路網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.qh.xinhuanet.com/qztlw/2006-07/28/content_7639372.htm
(2006,7,28)

⁶⁶ 參考「與藏人命運息息相關的青藏鐵路」，西藏通訊 <http://www.xizang-zhiye.org/b5/nl/57/index.html#6> 轉摘亞洲時報在線 2005.12.02 報導

監測儀器。在路基、坡腳角、路肩等斷面位置分別埋設了各種儀器，對鐵路斷面溫度和微小的變形都會有詳細的監測。目前，我們在長達 550 公里的凍土區設置了 40 多處監測點。⁶⁷」然十幾公里設置一處監測點就能確保行車安全嗎？另有中國科學家提醒表示，斥資 41 億美元的青藏鐵路可能將陷入危機——由於地球暖化的關係，青藏鐵路行經的永凍土層會在 10 年內開始融化，由中國相關部門輕忽全球暖化的影響狀況來看，似乎隱藏更多的危機。

雖然西伯利亞和斯堪地納維亞半島（Scandinavia）的凍土層上也建有鐵路，但由於青藏鐵路的緯度比它們低，海拔卻高出很多，烈陽高照的夏日對鐵路路基造成的傷害，可以達到地面 2 公尺以下，其危害程度遠大於其他類似的線路，建在凍土層上的青藏鐵路以時速 100 公里奔馳在青藏高原行車安全嗎？儘管中國宣稱已使用最新建築技術，然青藏鐵路出現不穩定的情況是不爭的事實，將來除了需要不斷投入昂貴的維護費用外，其是否因全球暖化的加速，導致青藏鐵路出現興建中國鐵道部無法預測之危機，實在令人擔憂。

陸、結語

雖然中國一再強調興建青藏鐵路在政治、經濟、戰略及國際宣傳上的意義和價值，但興建此工程對於西藏生態、環境及文化等方面都有相當程度的危害和影響也是不爭的事實，其中最為人垢病的包括：青藏鐵路環評公正性遭受質疑爭議⁶⁸、植被嚴重衰退⁶⁹、捕殺珍稀瀕危野生動

⁶⁷ 同註 43。

⁶⁸ 最早一份的環境評估是由中國國內科學家自行調查的《環境影響報告書》及《水土保持方案》。之後，中國更安排鐵一院、中國環境科學研究生態所、國家環保總局南京環境研究所的 14 名專家組成的「環境評估調查隊」深入青藏鐵路沿線實地勘察並撰寫環評報告，經鐵道部預審後，報國家環境保護總局和水利部審批通過。

物、濫挖藥材相應增加⁷⁰、犯罪率增加⁷¹、土地荒漠化日趨嚴重⁷²、對西藏文物破壞⁷³、現代病隨著火車大量傳入西藏⁷⁴等，都是各界持續關注的焦點；然而隨著全球暖化日趨嚴重，導致高原凍土加速融化，危及青藏鐵路的行車安全，這樣的現象更值得吾人關注，因此，本文試著以客觀的資訊從全球暖化對高原凍土的影響，來探究青藏鐵路的隱藏性危機，綜合上述內容歸納成下列幾點結論：

一、受全球暖化的影響，目前青藏高原年均溫上升的速度遠高於全中國及全球各地區

根據西藏自治區氣象局氣候中心進行的「全球變暖情景下的西藏氣候」研究分析得知：受全球暖化的影響，西藏年平均氣溫增長速度明顯高於全中國和全球的增長率。在全球氣候暖化的影響下，西藏地區氣候也呈現變暖的趨勢。西藏地區年平均氣溫大約每十年上升攝氏 0.3 度，

⁶⁹ 隨著鐵路沿線常住人口及流動人口增加，對沿線生態系統及其生物多樣性的干擾也將明顯增強。再加上通往各景區的道路增加，進一步破壞草原的生態環境，台大建築與城鄉所所長夏鑄九表示，在西藏那曲地區尼瑪縣境內已出現一條「全世界海拔最高且最寬闊的公路」，一望無際的大草原上全是越野車留下的輪胎痕跡。

⁷⁰ 台大建築與城鄉所所長夏鑄九表示，青藏高原生態系的脆弱性與難以回復性可從藏藥經濟看出，例如：需 10 年生長期才能製藥的紅景天，因藥商大肆採購導致盜採者橫行挖掘一空，迄今 10 年仍無法再栽育出一棵新樹。

⁷¹ 根據新華網西寧 2006 年 7 月 20 日的報導，青藏鐵路公安處破獲一啓盜竊鐵路電纜線的案件，很慶幸的是在未發生行車災情前就破案，但這也突顯管理之不易。

⁷² 目前西藏自治區的沙漠化土地面積高達 21 萬平方公里，足足是台灣面積 7 倍大，大規模鐵路工程，不免要開山劈石，鐵路沿線的植物群落必然受到破壞，加速荒漠化，導致水源消失。譬如在玉珠峰至沱沱河一段，有不少鐵路橋墩下的植物全被剷除，路軌附近亦有不少工程後所遺留下來的沙堆、泥坑。環保專家估計，被破壞的草木、植被，至少要 45 年至 60 年才可以恢復到原來的面貌。

⁷³ 湧入的觀光客將導致西藏相關旅遊硬體的大量建設，極有可能成為西藏傳統、歷史的一大浩劫，在五星級飯店磨拳擦掌準備大興土木之際，後果將可能造成西藏傳統古蹟、古物的破壞。

⁷⁴ 西藏經濟的提升，必定引發生活方式的改變；進而造成生活環境的變化，例如：鐵路帶來的「現代病」，包括：犯罪和娼妓的問題在西藏漸漸成型；另外空氣污染的問題在此地是前所未聞，但隨著車輛和工廠的增多，也將成為下一個關注的焦點。

明顯高於全中國和全球的增長率，目前中國氣溫增長速度在每 100 年上升攝氏 0.4 度⁷⁵。

二、受全球暖化的影響，未來青藏高原氣溫上升的速度將遠高於原先的預估值

根據科學家及氣象學家的研究顯示，全球暖化加速永凍土融化，而永凍土的融化會釋放大量的甲烷及二氧化碳，加速全球暖化現象，啟動全球性氣候變遷的惡性循環⁷⁶；根據英國自然雜誌 2006 年 9 月刊登的研究報告指出，從已經解凍的永久凍土中釋放出來的甲烷氣體速度，是人們原先預計的 5 倍；而凍土層釋出的甲烷對全球暖化的加乘效果更是難以估算，由於全球暖化的惡性循環已啟動，有科學家警告，永凍土的解凍速度會向上攀升，對未來地球溫度的預測必須向上修正⁷⁷，可以肯定未來青藏高原氣溫上升的速度，將遠高於原先修建工程時的預估值。

三、受全球暖化的影響，青藏鐵路的隱藏性危機

高原凍土的加速融化目前已對青藏鐵路產生影響，中國鐵道部發言人王勇平在青藏鐵路通車不滿一年時即已坦承，青藏鐵路部分路段的基礎凍土層已經出現下沈裂縫狀況，使得車廂在部分路段行車不穩，而部分混凝土結構也出現裂縫狀況，將可能造成行車安全隱憂⁷⁸。

未來在全球加速暖化的趨勢下，可以想像青藏鐵路的行車安全必定面臨更大的挑戰。依據中國鐵道部吳青柏副主任的說法：「青藏高原今

⁷⁵ 「西藏年平均氣溫增速明顯高於全球的增速」，新華網
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/www.xz.xinhuanet.com/xizangyaowen/2007-07/23/content_10647130.htm
(2007,7,23)

⁷⁶ 同註 32。

⁷⁷ 同註 29。

⁷⁸ 同註 54。

後氣溫如真的要上升攝氏 2 度，我們現在採取的冷卻技術是完全可以應對的。」由此旁證興建青藏鐵路時的原始氣溫預估，上升攝氏 2 度已是極大值，因此中國鐵道部才會信心滿滿的表示青藏鐵路的冷卻技術是完全可以應對的；但在全球暖化惡性循環啟動後，全球氣溫變化之大遠遠超過當初的預估，這可能是當處初工程設計始料未及的。如前揭結論一、二所述，目前青藏高原年均溫上升的速度遠高於全中國及全球各地區，而未來青藏高原氣溫上升的速度又會遠高於原先的預估值，因此其氣溫上升超過攝氏 2 度的機率，相對的就變的極為可能；屆時中國興建青藏鐵路，將沿線 550 公里的凍土區依照凍土溫度區分的 4 個區塊相應的凍土工程無法符合氣溫轉變後地質狀況，產生更嚴重的路段基礎凍土層出現下沈裂縫的現象，而混凝土結構和橋樑也可能出現相同現象，而嚴重青藏鐵路的行車安全，這樣的隱憂絕對值得預先籌謀。

中國鐵道部表示，全球氣候變暖對青藏鐵路的凍土層基本上不會產生不利的影響，並表示「全球氣候變暖是一個世界性的問題，也是一種自然規律。據氣象資料顯示，自中國唐代以來，地球的平均氣溫基本上是按照“冷、熱、冷”這樣一個客觀規律演化的，上一個“冷”的週期結束於剛剛過去的 20 世紀 80 年代，現在剛剛步入又一個“熱”的週期，這一週期大概持續到 2500 年左右。在這 500 年中，氣溫的升高是一個逐漸而緩慢的過程，每年升高的溫度僅僅在攝氏 0.02 至 0.03 度之間，這種細微的溫度變化對凍土的影響是很小的；另這種全球性的氣候變暖主要表現在冬季氣溫的變化上，而這種影響對於冬季氣溫常年在攝氏零下 30 度左右的青藏高原來說，更是微乎其微的；另一方面，設計中早已預先考慮了溫度變化可能帶來的影響，而且這種設計中的『留有餘地』，要

遠遠大於全球氣候變暖可能產生的結果。可以說，全球氣候變暖對青藏鐵路的凍土層基本上不會產生不利的影響⁷⁹。」由前揭結論一、二分析瞭解，中國鐵道部恐怕是持過分樂觀的看法。相對的，中國科學院院士程國棟的看法算是比較中肯的，他表示：「青藏鐵路的開通並不意味著大功告成，凍土難題的克服不是一勞永逸的，肯定會有許多問題需要不斷解決⁸⁰」。而國際凍土協會主席布朗的觀點則更加保守，他表示：「中國青藏鐵路工程代表國際凍土工程的最新進展，然包括青藏鐵路在內的凍土工程面臨的問題是極其複雜的，仍然需要不斷地探索研究。」人類在面對大自然時，或許謙卑才是千古不變的美德。

〔本文業於 96 年 7 月 16 日召開第 547 次委員會議暨 1100 次業務會報討論；96 年 8 月 6 日送審查；96 年 9 月 4 日審查完竣；96 年 9 月 6 日修正完成〕

⁷⁹ 同註 61。

⁸⁰ 同註 43。

表一、幾種主要溫室氣體的特性

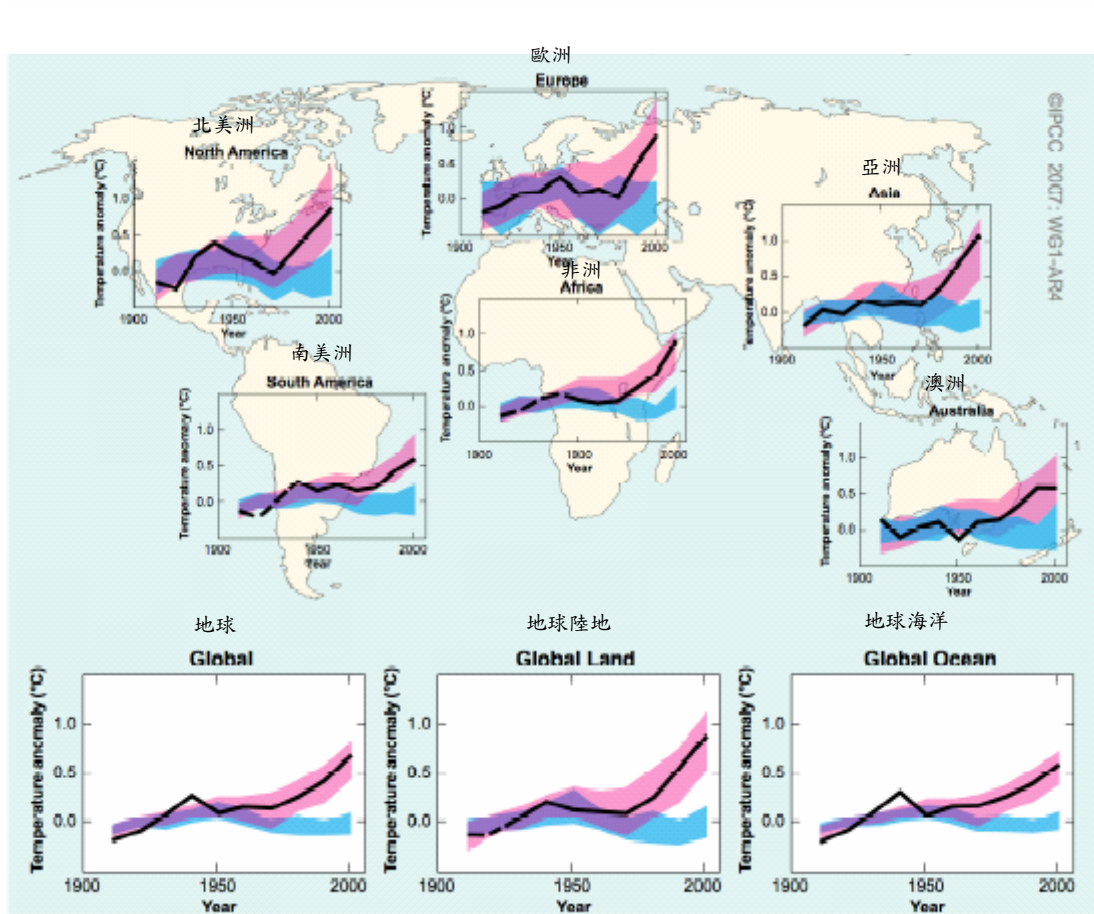
溫室氣體 (GHG)	源自 (SOURCE)	消失 (SINK)	對氣候的影響 (IMPACT)
二氧化碳 (CO ₂)	1)燃料 2)改變土地的使用 (砍伐森林)	1)被海洋吸收 2)植物的光合作用	吸收紅外線輻射，影響大氣平流層中O ₃ 的濃度
甲烷 (CH ₄)	1)生物體的燃燒 2)腸道發酵作用 3)水稻	1)和OH起化學作用 2)被土壤內的微生物吸取	吸收紅外線輻射，影響對流層中O ₃ 及OH的濃度，影響平流層中O ₃ 和H ₂ O的濃度，產生CO ₂
氧化亞氮 (N ₂ O)	1)生物體的燃燒 2)燃料 3)化肥	1)被土壤吸取 2)在大氣平流層中被光線分解與及和O起化學作用	吸收紅外線輻射，影響大氣平流層中O ₃ 的濃度
臭氧 (O ₃)	大氣中光化學反應生成作用，如：NO _x 與VOCs反應生成	與NO _x ，ClO _x 及HO _x 等化合物的催化反應。	吸收紫外光及紅外線輻射
一氧化碳 (CO)	人為排放（交通運輸和工業）	1)被土壤吸取 2)和氫氧根OH起化學作用	影響平流層中O ₃ 和OH的循環，產生CO ₂
氯氟碳化合物 (CFCs)	工業生產	在對流層中不易被分解，但在平流層中會被光線分解和跟O產生化學作用	吸收紅外線輻射，影響平流層中O ₃ 的濃度
二氧化硫 (SO ₂)	1)火山活動 2)煤及生物體的燃燒	1)乾和濕沉降 2)與氫氧根OH產生化學作用	形成懸浮粒子而散射太陽輻射

資料來源：IPCC, 「Climate Change 2001 : The Scientific Basis」

表二、青藏鐵路 9 項世界之最

9 項世界之最	青藏鐵路建設
1. 世界最高的火車站	海拔 5,068 公尺的唐古拉山車站
2. 世界最高的鋪架基地	青藏鐵路安多鋪架基地海拔 4,704 公尺
3. 世界最長的高原凍土隧道	全長 1,686 公尺的崑崙山隧道
4. 世界最高的高原凍土隧道	海拔 4,905 公尺的風火山隧道
5. 世界最長的高原凍土鐵路橋	全長 11.7 公里的青藏鐵路清水河特大橋
6. 世界線路最長的高原鐵路	格爾木至拉薩里程達 1,142 公里
7. 世界海拔最高的高原鐵路	鐵路穿越海拔 4,000 公尺以上地段達 960 公里，最高點為海拔 5,072 公尺
8. 世界高原凍土鐵路最高時速	青藏鐵路凍土地段時速將達到 100 公里，非凍土地段達到 120 公里
9. 世界上凍土里程最長的高原鐵路	穿越連續凍土里程達 550 公里

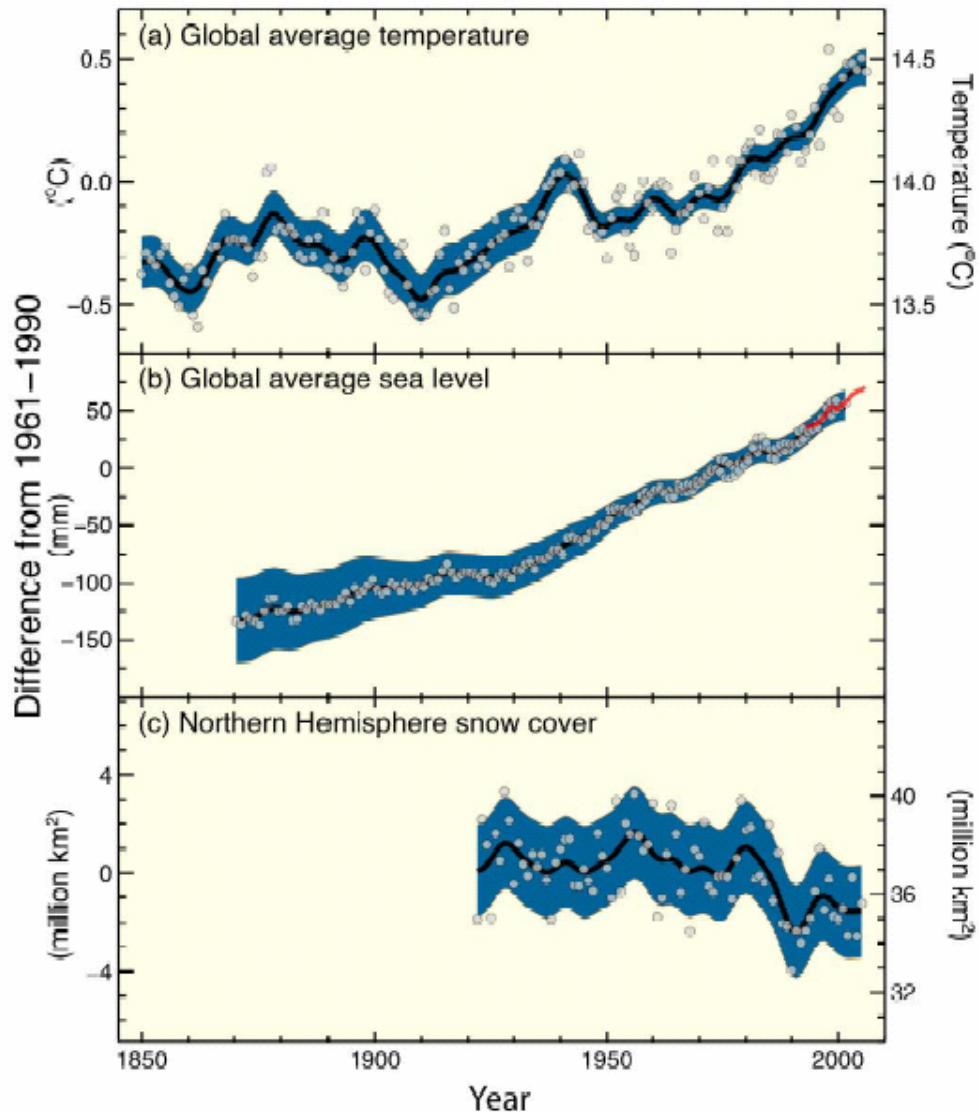
資料來源：彙理新華網 2006 年 7 月 2 日 「青藏鐵路開通之際回眸建設歷程」一文



用氣候模型模擬自然與人為的力量與實際各洲及地球表面溫度的變化對照下，1906-2005歷年平均值觀察到黑色線條所描繪的氣溫變化對應，1901-1950年歷年中線和平均相對偏差是有很大的差異，虛線的地方表示所佔的範圍小於 50%，藍色的陰影，是以5種大氣科學模型，做19次模擬試驗，數據顯示，在自然因素下，5%~95%的範圍中，對氣溫的影響是因為太陽黑子和火山的活動所造成；紅色的陰影，則是以 14種大氣科學模型，做58次模擬試驗，數據顯示，5%~95%的範圍中，是包括自然因素以及人為活動對氣溫的影響。

圖一、1990 年至 2000 年全球和各洲氣溫變化趨勢圖

資料來源：IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers



觀察(a)圖--地表平均溫度的改變，以及(b)圖--地球平均海平面高度(潮汐帶(藍色區塊))及(衛星資料(紅色區塊))，以及(c)圖--北半球3、4月時的雪線顯示，所有的改變均與1961年至1990年的相對應平均值相關。圖中，平滑曲線代表10年平均數值，白色圈代表每年數值；標示色塊部分，是從(a)圖及(b)圖的不可預知部分，以及根據(c)圖的連續紀錄，綜合分析而得的不確定區間估計數值。

圖二、氣溫、海平面高度及北半球雪線高度的變化

資料來源：IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers