

基于国际冻土分类进展 论中国土壤系统分类中冻土纲的恢复与重构

陈 杰 龚子同 陈志诚 檀满枝

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所) 南京 210008)

摘 要 由于与全球变化密切相关,发育于永久冻土层上的冻土资源受到了日益普遍的关注,冻土研究正在成为包括土壤学在内的多个学科的热点领域。为了达成多个目标,对冻土分类的深入研究势在必行。本文介绍了国际上有代表性的土壤分类系统中有关冻土分类的最近进展,并分析和讨论了存在的普遍问题以及在实际应用中面临的困难。同时,提出了在中国土壤系统分类框架内恢复和重构我国冻土分类的建议,阐述了我国土壤分类学界在这一领域内拥有的优势和可能面临的挑战。最后,根据我国冻土资源的特点,提出了关于恢复和重构我国冻土分类的具体意见。

关键词 土壤;冻土;永久冻土层;土壤分类
中图分类号 S151.3

永久冻土层(permafrost),又称多年冻土或永冻层,系指地球表层中,温度连续两年或两年以上保持 0°C 以下的土壤或岩石以及内含的固体水和有机物质。它与冰川、冰盖、积雪、海冰、河湖冰以及季节性冻土(seasonal frozen ground)一起构成冰冻圈(Cryosphere)这一特殊的圈层。由于在全球变化中具有重要作用,永久冻土与冰冻圈的其他组成部分一样,受到广泛关注。全球永久冻土分布面积 $22.79 \times 10^6 \text{ km}^2$ 左右,约占地球裸露地表总面积的24%,主要分布于北半球。加拿大、俄罗斯、中国北部以及美国的阿拉斯加是冻土广泛分布的主要地区。此外,沿 35°N 一线也有面积可观的分布,主要为高山永久冻土层(alpine permafrost),分布范围为以青藏高原、洛基山脉为中心的高山地区^[1,2]。南半球的永久冻土层主要分布在南极地区,尽管只有大约24%的南极陆地下伏永冻层,但南极地区分布的永久冻土层面积仍然达全球永久冻土层总面积的37%^[3,4](图1,2)。

土壤学上冻土(Cryosols)系指在土表下100 cm内有永久冻土层或在土表下200 cm内有永久冻土层、在土表下100 cm内有寒冻物质的一种土壤类型,其发生、发育与演变受永冻层和冻扰作用(cryoturbation)为主导的土壤低温过程(Cryopedological processes)的深刻影响。全球冻土面积大约

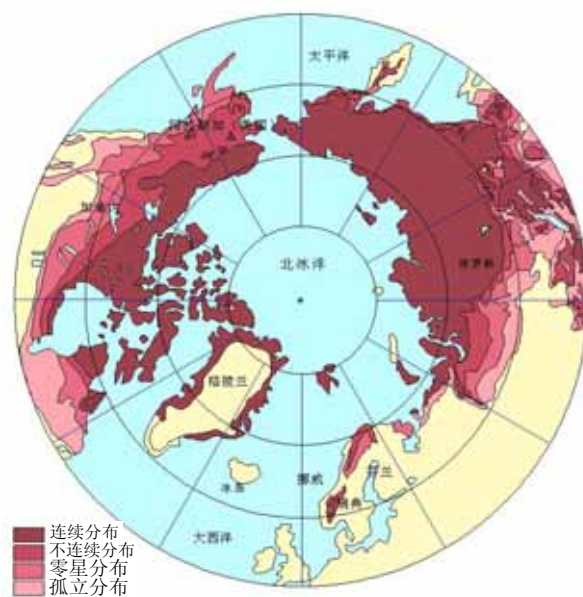


图1 世界永久冻土层分布(数据来源:国际冻土协会,2001)

Fig. 1 A permafrost distribution map of the world based on IPA source (Data source: International Permafrost Association, 2001)

为 $18 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全球裸露地表的13%左右^[5],其分布格局与永久冻土层在空间上既密切相关,又有显著差异。冻土是极地土被中具主导地位的土壤类型,在北半球的环极带(circumpolar zones)也有广泛分布,在一些纬度较低的高山地区则呈不连续或

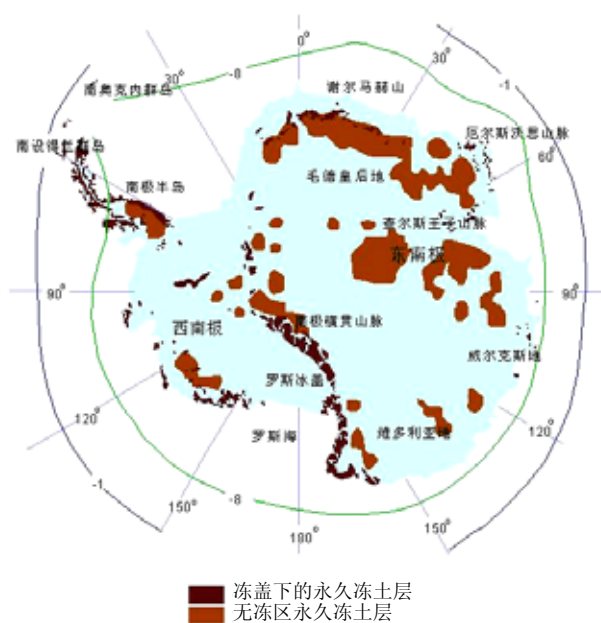


图2 南极大陆永久冻土层分布(根据Bockheim and Hall, 2002改编)

Fig. 2 A permafrost distribution map of the continental Antarctica (after Bockheim and Hall, 2002)

零星分布。世界上冻土资源面积最大的国家依次为俄罗斯、加拿大、中国和美国,面积分别为 10×10^6 、 2.5×10^6 、 1.9×10^6 、 $1.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。冻土在蒙古、北欧、格陵兰以及南极无冰区(ice-free areas)也有相当面积的分布^[6-8]。

全球变化无疑将对土壤圈演变产生重要影响,其中对冻土的影响将最为巨大。因此,冻土研究目前已经成为地学、生态学、气象学等多个学科研究的热点之一,受关注的程度早已超越农业生产与工程利用范畴。

1 冻土分类是当前冻土研究的热点领域

早在 20 世纪 20 年代,前苏联土壤学家就在俄罗斯北极地区开展了针对受永冻层影响的土壤(permafrost-affected or frost-affected soils)研究工作,但在西伯利亚北极地区以及俄罗斯远东地区的绝大部分冻土研究工作是在 20 世纪 50 年代以后进行的。20 世纪 60 年代以后,冻土研究相继在加拿大和南极地区展开。早期的冻土研究局限于土壤性状的一般调查以及地区性的土壤分类与制图工作^[9]。因为对低温土壤过程和冻土发生学特性所知甚少,早期的冻土分类在严格意义上只是尝试开发一种用于土壤调查的工具,一般根据限制农业与工

程利用的土壤属性对不同的冻土进行归类。

20 世纪 90 年代以后,冻土研究的热点领域转向全球变化,尤其是全球气候变暖对冻土资源的影响,以及永冻环境陆地生态系统对这一变化趋势的反馈作用与机制。其中,变化中的全球气候引发的冻土退化与冻土面积萎缩所产生的高寒陆地生态效应与环境效应倍受关注^[9, 10]。首先,北半球的冻土可视为地球上巨大的碳(C)库,贮存着大量的有机 C,仅北极地区的 C 储量就相当于全球 C 储量的大约 14%^[9, 11]。随着全球变暖过程中土壤温度的不断升高,冻土活动层(active layer)变深,冻层融化,微生物活动加强,土壤 C 逐渐分解,排放出大量 CH_4 和 CO_2 等温室气体,反过来会加速全球气候变化的进程。有关数据显示,北半球的冻土在全球 C 循环中的作用正由巨大的 C 汇变为潜在的 C 源^[12]。从冻土本身而言,其下伏的永久冻土层尽管名为永冻,而事实上不稳定恰恰是它最突出的特性^[1]。随着土壤温度升高,冻土的解冻深度(thaw depth)迅速增加,导致冻土分布面积急剧减少。这一方面将对寒冷地区的陆地生态系统、野生动物活动以及当地居民的生活方式产生深刻的影响;另一方面,冻-融深度的变化可能会直接造成寒冷地区建筑、道路、管网等基础设施严重的甚至是毁灭性的破坏。

北半球冻土带 C 储量的估算与土壤 C 素动态监测需要庞大的土壤数据库,而系统、完善的土壤数据库的构建必须基于科学的冻土分类。同时,土壤分类研究有助于对低温土壤过程与冻土发生学特性的深入了解,从而促进对冻土退化过程、机制与防治措施方面的研究,对探索高寒地区脆弱陆地生态系统的保护工作意义重大。此外,土壤分类是推动与冻土相关议题的国际交流合作的重要媒介,是全球性冻土资源动态变化与生态环境效应评估方面所必需的重要工具。因此,迫切地需要一个客观的、标准的且具有共同国际基础的冻土分类系统。而为达成这一目标,开展与分类有关的、更深层次的冻土研究工作势在必行。

2 世界冻土分类现状

土壤系统分类(soil taxonomy)不同于普通意义的土壤分类(soil classification),系统分类的内涵小于分类,即土壤分类包含土壤系统分类。除此之外,土壤分类还包含为特定目的服务的土壤归类。因此,理论上完美的土壤分类在服务于设计目的时

不应该存在任何障碍。作为土壤分类的最重要组成部分, 土壤系统分类的核心作用是建立一个层级式的类别结构组织 (hierarchies of classes) 以明确不同土壤之间、土壤与其属性控制因素之间的相互关系; 同时为土壤科学提供一个重要的沟通工具。由于不同国家和国际机构的土壤系统分类体系之间不会因为其特定分类目的不同而影响相互间的沟通与参与, 因此土壤系统分类已成为国际合作与交流的主要分类形式。目前世界上只有 3 个系统分类体系含有冻土分类, 分别为《加拿大土壤分类系统》、《美国土壤系统分类》以及《WRB 土壤分类系统》。

2.1 加拿大土壤分类系统

尽管加拿大北部地区分布着大面积受永冻层影响的土壤, 但在 20 世纪 50 年代出版发行并于 1974 年修订的加拿大土壤分类系统 (System of Soil Classification for Canada) 中, 这类土壤并未被作为独立的土纲在第一级单元中体现。直到 1978 年, 新版的《加拿大土壤分类系统》(Canadian System of Soil Classification) 才重新认识到受永冻层影响的土壤在本国土壤资源中的重要地位, 而在顶级单元中确立了冻土纲 (Cryosolic soils) [13]。

作为国际上第一个在顶级单元中确立冻土纲的现代土壤分类系统, 《加拿大土壤分类系统》关于冻土纲的定义为: 形成和发育于矿质或有机物质之上, 土体距地表 100 cm 深处以内出现永冻层; 或 200 cm 深处以内出现永冻层, 同时活动层内土体受冻扰作用影响强烈, 且有以中断、混合、破碎为形态特征的发生层即冻扰层 (Cryoturbated Horizon) 出现的土壤。冻土的年均土壤温度低于 0 °C。加拿大土壤分类系统根据土壤物质特性、土壤冻扰程度, 在冻土纲下划分 3 个大土类 (great groups, 二级单元), 分别为扰动冻土 (Turbic Cryosols)、稳定冻土 (Static Cryosols) 和有机冻土 (Organic Cryosols) [14]。

与 1987 年发行的《加拿大土壤分类系统 (第 2 版)》相比, 新近发行的第 3 版着重对冻土纲进行了有关的修订。在冻扰和稳定两个大土类下增设了若干亚类 (三级单元), 并对 3 个大土类下所有亚类的定义与描述进行了修改与完善, 使之在形式上尽量统一, 在内容上尽可能明确亚类的诊断特性 [12, 15]。

2.2 美国土壤系统分类

继 1990 年增加火山灰土纲 (Andisols) 之后, 1999 年出版的《美国土壤系统分类 (第 2 版)》又新增了冻土纲。与加拿大分类系统中的冻土纲名

称不同, 《美国土壤系统分类》中的冻土纲表达为 Gelisols。作为美国土壤系统分类中的第 12 个土纲, 冻土的中心定义可以概括为: 土体中含有冻土物质 (gelic materials) 且下伏永冻层的土壤。具体地, 冻土必须具有下列属性之一: ①土体距地表 100 cm 以内出现永冻层; 或②土体距地表 100 cm 以内出现冻土物质, 且 200 cm 以内出现永冻层 [16]。

冻土中可以出现、也可以不出现特征性的诊断层, 但 100 cm 以下、200 cm 以内出现永冻层的土壤必须出现冻土物质这一重要的土壤诊断特性 (diagnostic soil characteristics)。按照定义, 冻土物质为活动层内和/或永冻层上部有明显冻扰作用特征和/或冰间离现象 (ice segregation) 的矿质或有机土壤物质。与冻土物质有关的形态特征包括在冻扰过程中土壤物质经过分选、排列、聚集、粘结等作用形成的片状、块状以及粒状微结构 [16~18]。

在美国土壤系统分类中, 冻土纲下也划分 3 个亚纲, 分别为有机冻土 (Histels)、正常冻土 (Orthels) 以及扰动冻土 (Turbels) 亚纲。有机冻土是指含有大量有机物质的冻土, 而有机物质一般在厌氧条件下积聚, 或其中至少一部分空隙为碎片、煤渣灰烬或浮石物质 (pumiceous materials) 所充填。正常冻土是指那些土体中没有或冻扰特征微弱的冻土, 是冻土的第二大亚纲, 通常比其他两个亚纲的冻土较为干旱。扰动冻土含有 1 个或 1 个以上具有明显冻扰特征的发生层, 发生层边界具有不规则、破碎或者扭曲现象, 在永冻层、地冰 (ground ice) 或者岩砾顶部有明显的有机质积聚特征。作为冻土纲中具主导地位的亚纲, 扰动冻土分布面积约占全球冻土面积的一半 [16]。

2.3 世界土壤资源参比基础

1992 年由国际土壤学会 (ISSS)、FAO 以及国际土壤参比与信息中心 (ISRIC: International Soil Reference and Information Centre) 联合成立的世界土壤资源参比基础 (WRB: World Reference Base for Soil Resources) 取代了于 1980 年由 FAO、联合国环境署 (UNEP) 以及国际土壤学会共同成立的国际土壤分类参比基础 (IRB: the International Reference Base for Soil Classification)。在 IRB 的基础上, WRB 广泛地吸收了各国土壤学家的智慧、土壤分类学的最新进展和世界土壤资源研究的最新成果, 这标志着国际土壤分类进入了一个新的发展阶段。WRB 的最终目的不是取代各国现有的土壤分类系

统,而是为各国分类系统之间相关性的协调和国际土壤分类的交流合作提供了一个有力的工具^[19]。

在重新修订 FAO/UNESCO 世界土壤图图例系统的基础上,WRB 增删了土壤分类单元,重新构建了由 30 个参比土类(reference soil groups)及其下属单元组成的分类体系。作为 1998 年新近修订的 WRB 分类系统中 3 个新增参比土类之一(另两个分别为 Durisols 和 Umbrisols),冻土(Cryosols)用以甄别永冻环境中受冻融交替作用影响的土壤。具体定义为:土体距地表 100 cm 以内含有 1 个或 1 个以上寒冻层(cryic horizon)的土壤。这里的寒冻层实质上就是矿质或有机土壤物质永久冻结层,可通过以下特性诊断:①土壤温度连续 2 年在 0℃以下;②如果土壤富含孔隙水,有明显的冻扰现象;如果土壤缺乏孔隙水,则冻结的土壤物质有明显的热缩现象(thermal contraction);③土体内出现由冰脉(vein ice)发育产生的片状或块状微结构以及由粗粒土壤物质分选过程产生的环状或条带状微结构^[19]。

为了确保分类系统的简洁性和可操作性,WRB 划分低级单元的诊断标准大部分使用的是确立参比土类时应用的诊断层和诊断特性。由于寒冻层可能同时具有有机层(histic horizon)、火山灰层(andic horizon)以及灰化淀积层(spodic horizon)等其他诊断层的特性,并且可能与盐积层(salic horizon)、钙积层(calcic horizon)、松软表层(mollic horizon)、暗色表层(umbric horizon)或淡色表层(ochric horizon)等诊断层同时出现在土体内,因此冻土参比土类下划分出包括有机冻土、盐积冻土、火山灰冻土、暗色冻土、松软冻土、钙积冻土等在内的 19 个常见土壤单元(soil units)(二级单元)^[8,19]。

上述新近修订的分类系统在冻土分类方面有 3 个共同点。首先,尽管名称不同,3 个分类系统均在顶级单元确立了冻土纲(类);其次,一定深度内存在永冻层均为区分冻土与其他土壤类型首要的诊断标准;同时,冻扰作用形成的土壤形态特征在 3 个分类系统中均广泛应用于冻土划分。

然而,在上述 3 个不同分类系统中,冻土下伏永冻层的深度要求却有所不同。加拿大土壤分类系统和美国土壤系统分类要求永冻层埋深 100 cm 或 200 cm(附加其他诊断要求)以内,而 WRB 分类系统则规定冻土中永冻层埋深必须在 100 cm 以内。此外,在土壤冻扰特征方面,加拿大和 WRB 分

类系统分别选择冻扰层和寒冻层作为冻土的诊断层,而美国土壤系统分类则选择冻土物质作为冻土的诊断特性。3 个分类系统中冻土在低级单元上的划分差异较大,这是由于用于分类的土壤资源不同,分类系统的应用范围不同,系统结构本身就存在明显差异的结果。

3 国际冻土分类中存在的主要问题

毋庸置疑,前面论述的三大土壤分类系统在促进世界冻土分类发展和寒冷环境中土壤发生学、土壤形态学的深入研究方面发挥了巨大的作用。事实上,新近修订的三大分类系统已经在国际上基本确立了冻土分类的概念性框架。在这一框架中,用以划分不同冻土单元的土壤诊断层和诊断特性被赋予了严格的定义,同一级别的分类单元在不同系统之间具有相同和相近的参比基础,因此具有较好的可比性。可以说,冻土分类在上述三大分类系统中的尝试和修订,代表了世界冻土分类发展的方向和趋势。然而,《加拿大土壤分类系统》、《美国土壤系统分类》和 WRB 分类系统中有关冻土分类方面仍存在有待发展与完善之处,特别是在实际应用过程中共同存在的几个问题很大程度上降低了上述三大系统中冻土分类的可操作性。

3.1 永冻层及埋深的野外测定存在极大困难

加拿大土壤分类系统、美国土壤系统分类和 WRB 分类系统均将永冻层在土体一定深度内出现作为界定冻土的首要标准。我们知道,永冻层的诊断既不取决于内部的物质组成,也不取决于水分含量与形态,永冻层实质上是一个完全意义上的温度概念(thermal condition)。因此,野外土壤调查面临的最大困难是如何才能准确确定土壤是否下伏永冻层及其埋藏深度。在极地以及环极地高纬度地区,由于土壤下伏永冻层是一个不争的事实,其埋深方面由于永冻层在大范围内呈连续分布而相对易于确定,因此,这一问题并不突出。但在低纬度以及高海拔地区,永冻层一般呈不连续、岛状和零星状态分布,因而永冻层的野外确定遭遇了巨大的挑战^[20]。一方面,难以确定永冻层横向分布的准确位置;另一方面,由于高山地区土层普遍较薄且多下伏基岩或石质接触,永冻层纵向深度的确定同样困难。即使应用包括地透雷达(Ground Penetrating Radar)在内的先进技术与设备,仍然无法切实解决这一问题。因为永冻层的温度要求为连续 2 年在 0℃以下,所

以单次野外调查数据理论上无法确定永冻层是否存在。此外, 确切判定永冻层的埋深是否符合冻土的诊断要求, 客观上要求野外调查必须在土壤解冻深度(即活动层所能达到的深度)最大时进行, 这事实上是不可能的。

简言之, 在永冻层确定方面的3个具体问题很大程度上限制了三大分类系统中冻土分类的可操作性: ①客观上无法在野外确定土壤的最大解冻深度; ②对高海拔地区土层浅薄土壤下伏永冻层及其埋深的确定存在极大困难; ③除非有系统全面的长期定位监测数据, 否则难以在永冻层分布不连续的地区准确确定其分布范围。

3.2 永冻层的土壤发生学意义难以体现

发育于加拿大北部和美国阿拉斯加的冻土与位于相近纬度的俄罗斯远东地区分布的冻土在形态学上的比较结果显示, 前者的冻土其冻扰作用与土壤冻扰特征明显地强于后者^[21]。这两种土壤均在相似的深度内出现永冻层, 那么究竟是什么因素导致了它们在形态特征上的巨大差异? 永冻层在冻土发育中的土壤发生学意义究竟是什么? 永冻层及其埋深与土壤冻扰作用之间究竟是否存在必要联系?

众所周知, 冻扰作用是寒冷地区居主导地位的土壤发生学过程, 而加拿大土壤分类系统、美国土壤系统分类以及 WRB 分类系统则是强调土壤发生过程及其导致的土壤特性的诊断分类系统。这些分类系统把永冻层作为界定冻土的首要诊断标准, 但永冻层的发生学意义却没有在系统中得以明确地体现。而事实上, 也很难在实际土壤调查中严格地区分冻土中的冻扰特征以及其他由低温过程导致的土壤形态特征究竟产生于季节性土壤冻结还是永冻层的存在。从这个意义上说, 季节性冻结与永冻层在冻土诊断上应处于相同或相近的地位, 单纯地强调永冻层与其埋深, 缺少发生学依据。另外, 由于发育于高海拔地区的土壤其下伏永冻层的埋深可能远大于土层厚度, 永冻层存在与否, 对土壤属性的形成与表达不产生实质性的影响。因此, 永冻层作为冻土诊断标准在此类土壤分类上的应用, 一定程度上偏离了诊断分类的方向, 而带有明显的发生分类的印记。

3.3 复杂地形气候下的土被归纳面临巨大挑战

过去相当长一个时期内, 永冻层地理位置与分布范围的确定一直基于地温与地表气温一致的假设。而事实上, 众多因素导致二者之间存在明显的差异。如在地表气温常年处于冰点以下的某些冰川、

河流之下实际并不存在永冻层^[1], 这一现象与地形气候(topoclimate)密切相关。地形气候是一个相对复杂的气候概念, 包含海拔、坡向、坡度、植被、地表物质组成等多种影响因素^[22]。在寒冷地区, 季节性积雪是影响地形气候的一个关键因素, 它不仅对土壤温度状况产生重要影响, 而且对土壤水分状况影响深刻^[23, 24]。

由于受地形气候的强烈影响, 高海拔地区永冻层分布的不连续性不仅体现在空间上, 而且体现在时间上^[4], 这就使以永冻层及其埋深为首要依据的冻土分类在此类地区的应用面临巨大的挑战。首先, 由于以现有的知识和经验, 不可能在实际中准确判定地形气候影响因素对土壤温度及土壤水分状况的影响程度, 从而无法准确判定永冻层在空间和时间上的动态变化规律, 土壤分类学家难以找到一种可靠的途径在野外进行土被分析与类型归纳, 难以把分类结果在土壤图上准确地勾绘图斑^[20]。另外, 除永冻层被赋予了严格的温度定义外, 在三大分类系统中, 尤其是在1999年以前版本的《美国土壤系统分类》中, 还将包括永冻温度状况在内的土壤温度状况确立为不同级别冻土单元划分的标准。但从以美国土壤系统分类为基础的世界土壤温度状况图上不难看出, 冻土土壤温度状况的划分, 并没有体现地形气候因素的影响(图3)^[16]。鉴于此, 1999

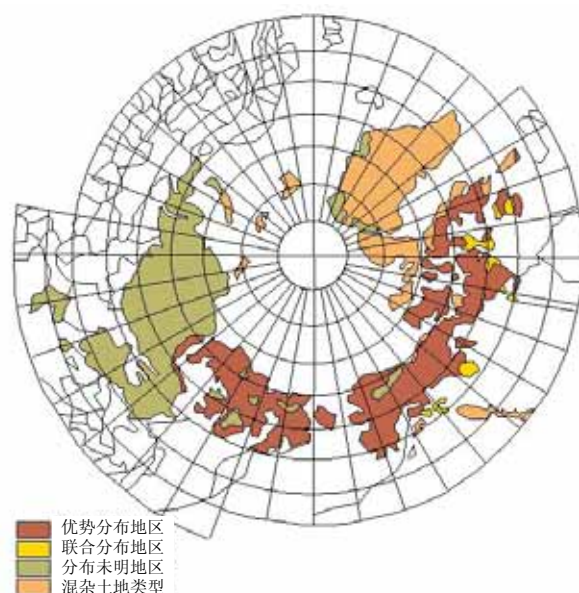


图3 基于WRB及FAO/UNESCO世界土壤图的冻土分布

Fig. 3 A Cryosol distribution map of the world based on WRB and the FAO/UNESCO Soil Map of the World (after FAO-GIS, 1997, with different projection)

年新版《美国土壤系统分类》中,永冻温度状况不再作为土壤诊断特性之一。

4 中国冻土分类的机遇与挑战

4.1 中国永久冻土层的分布及其相关土壤

中国永久冻土层的分布面积仅次于俄罗斯和加拿大,位居世界第三。总面积 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全国陆地面积的 22.4 % 左右^[25]。中国境内的永久冻土层主要分布于东北高纬度地区和西北高海拔地区。东北高纬度永久冻土层分布范围在 $46^\circ 30' \text{ N} \sim 53^\circ 30' \text{ N}$ 之间,海拔多在 1000 m 以下;西北高海拔冻土主要分布于青藏高原及其附近山区,海拔多在 2000 m 以上。大部分高海拔永久冻土分布于 35° N 以南地区,最南可达 27° N 。我国是世界上高海拔冻土分布面积最大的国家,高海拔冻土面积 $1.76 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占中国永久冻土总面积的 82.2 %, 占北半球永久冻土面积的 75.5 %^[26] (图 4)。

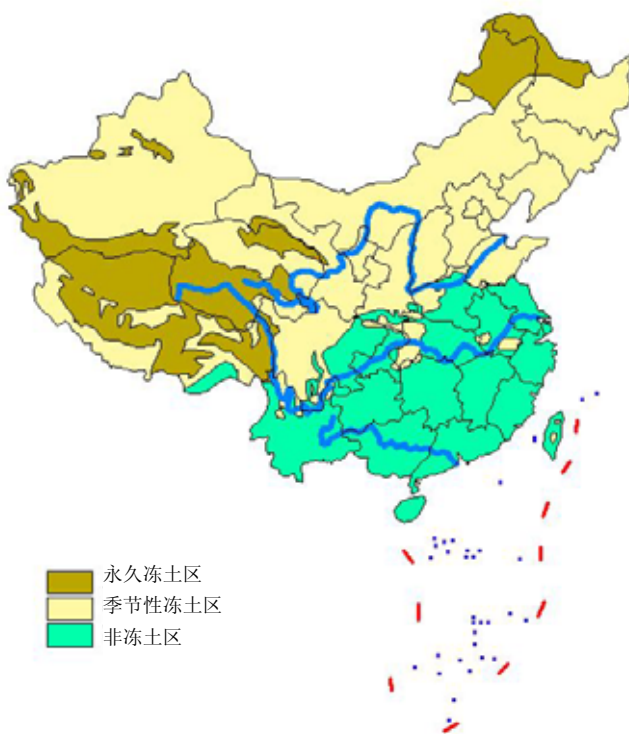


图4 中国冻结土壤的分布与类型 (资料来源:中国科技博物馆)

Fig. 4 Distribution of frozen ground in China (source: Science Museums of China)

在我国过去的土壤发生分类系统中并没有设立专门的冻土类型,受东北永久冻土层影响的土壤主要分属于连续分布的棕色针叶林土、灰黑土、灰色森林土等地带性土壤以及潜育土、泥炭土等不连续

或零星分布的非地带性土壤之中。与高纬度永久冻土区的土壤分布相比,由于受海拔高度、地理纬度以及地形气候的多重影响,高海拔永久冻土区的土壤分布相对复杂,主要分属于高山漠土、高山寒冻土(寒漠土)和高山草甸土(草毡土)等类型之中^[26]。

4.2 系统分类框架下的中国冻土分类尝试

土壤系统分类的理论与方法在 1985 年引入国内之前,冻土在中国过去各个时期的发生分类系统中均未能作为独立的分类单元出现。在土壤系统分类引入中国两年后,即 1987 年,《中国土壤系统分类(二稿)》(以下简称《二稿》)面世。在这一分类方案中,受永久冻土层影响的土壤被确立为独立土纲,即冻土纲,这在中国土壤分类历史上尚属首次。同时,冻土纲在中国土壤分类系统中的出现比美国土壤系统分类和 WRB 分类系统中冻土纲的正式设立早 10 年以上^[27, 28]。

在《二稿》中,冻土被定义为:“土体距地表 100 cm 深处以内有永冻温度状况,地表具多边形土(石环)等冻扰形态特征的土壤”。这里的永冻温度状况系指土壤温度常年处于或低于 0° C , 实质上与永冻层有相同的含义。在其他诊断特性方面,没有对土体内部土壤冻扰特征做具体的限定。可以看出,《二稿》中的冻土与 WRB 分类系统中的冻土在定义上基本一致,但在下级单元的划分方面,《二稿》中的冻土纲只简单地分为湿冻土(即常潮湿冻土)和干冻土(即干旱冻土)两个亚纲。湿冻土亚纲下续分为冰潜育土(或冰沼土)类(只有典型冰潜育土 1 个亚类)和冰泥炭土类(分为纤维冰泥炭土和半分解冰泥炭土 2 个亚类);干冻土亚纲下只有冻漠土 1 个土类,专指分布于高海拔的荒漠土壤。由于缺乏明确的土壤诊断特性尤其是形态学诊断特征,《二稿》中的冻土分类在实际应用上存在很大困难。某种意义上,《二稿》只是构筑了冻土分类的粗略框架,而非具有实际操作意义的、完整的冻土分类体系^[28-30]。

随后在 1991 年出版的《中国土壤系统分类(首次方案)》和 1995 年出版的《中国土壤系统分类(修订方案)》中,出于多种原因,冻土没有继续作为独立的土纲出现。然而,《中国土壤系统分类(首次方案)》确立了两个与冻土直接相关的土壤诊断特性,即永冻层(permafrost layer)和土壤冻融特性(frost-thawic features),用以在第二和第三

级单元中划分某些土纲下的寒冻或永冻亚纲和土类。在中国土壤系统分类中, 定义永冻层的温度要求为“土表 200 cm 范围内土壤温度常年 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ”, 这与美国土壤系统分类、加拿大土壤分类系统以及 WRB 分类系统中永冻层的定义不完全相同^[31~34]。

1993 年, 赵其国等^[26, 34]曾撰文提议在中国土壤系统分类中恢复设立冻土纲, 并建议在冻土纲下划分正常冻土 (Orthic Gelisols) 和高寒冻土 (Altoctic Gelisols) 两个亚纲, 分别涵盖高纬度冻土和高海拔冻土。由于冻土当时在低级单元上缺乏系统的诊断分类基础, 这一建议没有被中国土壤系统分类采纳。

4.3 中国土壤系统分类中冻土分类的恢复与重构

对冻土研究的关注以及促进全球范围内冻土分类的必要性与紧迫性已经在前面讨论, 这里不赘述。中国作为世界上冻土分布面积最大的国家之一, 在中国土壤系统框架内恢复和重构冻土分类是我国冻土研究必须优先解决的问题。目前, 在冻土分类领域, 我国土壤学家具有以下几个方面的优势: ①国内已经建立了用于多种目的的冰冻圈层特别是永久冻土层的长期定位监测网和系统的数据库网络; ②冻土地区长期的农业生产与工程利用为深入了解冻土属性奠定了坚实的基础; ③土壤系统分类引进初期冻土分类的有益尝试为将来的深入研究积累了宝贵的经验; ④国际先进的系统分类理论与方法通过近 20 年的实践在中国已经日趋成熟, 为将来的冻土分类提供了系统基础; ⑤广泛的交流与合作确保了我国土壤学家可以从国际上现有的冻土分类中借鉴有关冻土诊断层、诊断特性方面的有益经验。

然而, 应该清醒地认识到, 要建立一个成功的冻土分类体系, 中国土壤学家依然面临严峻的挑战。首先, 我国冻土分布以高度的不连续性为特点, 其中高海拔冻土占有相当高的比例。下伏永冻层的变异不仅体现在空间上, 而且体现在时间上, 包括地形气候在内的各种因素对永冻层的动态变化以及冻土的发生、发育与空间结构产生复杂影响, 是我国冻土分类所要面对的客观困难。另外, 如前面所述, 国际上现有冻土分类所存在的问题, 很大程度上限制了在实际应用中的可操作性, 这就主观上要求中国土壤学家在将来的分类中加以改进和解决。有鉴于此, 中国冻土分类的研究重点应该放在以下几个方面。

(1) 在冻土地区开展全面系统的土壤调查工

作, 建立单个土体数量尽可能多、属性尽可能详细的综合冻土数据库, 以保证将来冻土分类的广泛包容性和坚实的归纳基础。

(2) 从国际上现有冻土分类的经验教训着手, 深入研究永冻层特性, 进而重新审订其定义, 同时开发相应的野外诊断方法与技术。另外, 开发在永冻层不连续地区进行土被结构分析与归纳的理论与方法。

(3) 深入研究包括冻扰作用在内的低温土壤过程及其对土壤理化性状与形态学特征的影响, 阐述永冻层及其埋深的土壤发生学意义, 并在此基础上确立冻土诊断层与诊断特性。

(4) 对国内高海拔冻土进行重点研究, 在各级分类单元的设置、定义、诊断层和诊断特性的确立及其野外应用上充分考虑复杂因素对冻土成土条件、成土过程、土壤性状、永冻层深度等方面的影响, 摸清上述主要因素的发生学意义, 并在分类中以一种可操作的形式体现出来。

(5) 继续加强冻土分类方面的广泛合作, 掌握国际冻土分类的发展趋势与方向, 共享国际冻土研究的最新成果, 确保中国将来的冻土分类既有鲜明的自身特点, 又有广泛的兼容性和坚实的国际参比基础。

参考文献

- 1 Williams PJ, Smith MW. The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology. Cambridge: Cambridge University Press, 1989
- 2 Zhang T, Barry RG, Knowles K, Heginbottom JA, Brown J. Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere. Polar Geography, 1999, 23 (2): 147 ~ 169
- 3 Bockheim JG. Permafrost distribution in the Southern Circumpolar Region and its relation to the environment: A review and recommendations for further research. Permafrost and Periglacial Proc., 1995, 6, 27 ~ 45
- 4 French HM. The Periglacial Environment. 2nd ed. Essex: Longmans, 1996
- 5 Bockheim JG, Ping CL, Moore JP, Kimble JM. Gelisols: A new proposed order for permafrost-affected soils. In: Kimble JM, Ahrens RJ. eds. Proc. Meeting on Classification, Correlation, and Management of Permafrost-Affected Soils. Washington DC: Soil Conserv. Serv., 1994,

- 25 ~ 45
- 6 Driessen P, Deckers J, Spaargaren O, Nachtergaele F. Lecture notes on the major soils of the world. In: FAO. ed. World Soil Resources Report No. 94. Rome, 2001
- 7 陈杰, 龚子同, Blume HP, 阮心玲. 南极半岛海洋气候区的土壤: I. 冻-融作用与水分状况. 土壤, 2003, 36 (1): 5 ~ 11
- 8 Chen J, Gong ZT. Rock weathering tendency at different stages of soil-forming processes in Fildes Peninsula, Antarctic. *Pedosphere*, 1996, 6 (1): 29 ~ 34
- 9 Tarnocai C. Carbon pools in soils of the Arctic, Subarctic and boreal regions of Canada. In: Lal R, Kimble JM, Stewart BA. eds. Global Climate Change and Cold Regions Ecosystems, *Advances in Soil Science*. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers, 2003, 91 ~ 103
- 10 Broll G. Influence of overgrazing by reindeer on soil organic matter and soil microclimate of well-drained soils in the Finnish Subarctic, In: Lal R, Kimble JM, Stewart BA. eds. Global Climate Change and Cold Regions Ecosystems, *Advances in Soil Science*. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers, 2000, 163 ~ 172
- 11 Tarnocai C. The amount of organic carbon in various soil orders and ecological provinces in Canada. In: Lal R, Kimble JM, Follett RLF, Stewart BA. eds. Soil Processes and the Carbon Cycle, *Advances in Soil Science*. New York: CRC Press, 1998, 81 ~ 92
- 12 Tarnocai C. The effect of climate warming on the carbon balance of Cryosols in Canada. In: Tarnocai C, King R, Smith S. eds. Cryosols and Cryogenic Environments, Special Issue of Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 10, No. 3. 1999, 251 ~ 263
- 13 Agriculture Canada. A system of soil classification for Canada. Agric. Can. Publ. 1455. Revised. Information Canada, Ottawa, Ont., 1974, 255
- 14 Soil Classification Working Group. The Canadian System of Soil Classification. 3rd ed. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1646, 1998, 187
- 15 Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. The Canadian system of soil classification. 2nd ed. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1646, 1987, 164
- 16 Soil Survey Staff. Soil Taxonomy. 2nd ed. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook, Natural Resources Conservation Service Number 436. Washington DC, 1999, 871
- 17 Fox CA. Micromorphology of permafrost affected soils. In: Kimble JM, Ahrens R. eds. Proc. Meeting on Classification, Correlation, and Management of Permafrost-Affected soils. July 18 ~ 30, 1993. Alaska, U.S.A and Yukon and Northwest Territories, Canada. U.S. Dept. Agric., Soil Conserv. Serv., Washington DC, 1994, 51 ~ 62
- 18 Bockheim JG, Tarnocai C. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. *Geoderma*, 1998, 81: 281 ~ 293
- 19 FAO, ISRIC (International Soil Reference and Information Centre), ISSS (International Society of Soil Science). World Reference Base for Soil Resources. Rome: World Soil Resources Reports 84, 1998, 109
- 20 Thorn CE, Darmody RG. Permafrost and ground temperature regimes: A challenging soil classification problem in low arctic and alpine environments. *Geografisk Tidsskrift, Danish Journal of Geography*, 2002, 102: 1 ~ 9
- 21 Kimble JM, Ping CL, Tarnocai C, Smith S, Mazhitova GG. Comparison of Permafrost-Affected Soil of North Canada, Alaska, and the Lower Kolyma Region of Far Eastern Russia (an unpublished poster), 1999
- 22 Geiger R. The Climate Near the Ground. 2nd ed. Cambridge: Harvard University Press, 1965, 235
- 23 Goodrich LE. The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19: 421 ~ 432
- 24 Thorn CE. The geomorphic role of snow. *Annals of the Association of American Geographers*, 1978, 68: 414 ~ 425
- 25 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 程国栋, 李树德. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2002, 450
- 26 赵其国, 王浩清, 顾国安. 中国的冻土. 土壤学报, 1993, 30 (4): 341 ~ 354
- 27 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类 (二稿). 土壤学进展 (土壤系统分类研讨会特刊), 1987, 69 ~ 104
- 28 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类初拟. 土壤, 1985, 17 (6): 290 ~ 318
- 29 南都国, 张之一, 赵良奇. 三江平原潜育土土壤温度状况及其与气温的相关关系研究. 土壤学报, 1995, 32 (增刊): 112 ~ 113

- 30 Liu DS, Wang ZS. A modeling study of potential evapotranspiration and the estimation of Chinese soil moisture regimes. *Pedosphere*, 1996, 6 (3): 193 ~ 200
- 31 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类(首次方案). 北京: 科学出版社, 1991, 1 ~ 120
- 32 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类(修订方案). 北京: 中国农业科技出版社, 1995, 1 ~ 218
- 33 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001, 1 ~ 275
- 34 Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. *Chinese Soil Taxonomy*. Beijing: Science Press, 2001, 203

SUGGESTIONS FOR RESUMPTION AND RECONSTRUCTION OF CHINESE CRYOSOL CLASSIFICATION BASED ON RECENT INTERNATIONAL PROGRESS IN CRYOSOL CLASSIFICATION

CHEN Jie GONG Zi-tong CHEN Zhi-cheng TAN Man-zhi

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008)

Abstract International concerns about the effects of global warming on permafrost-affected soils and responses of permafrost terrestrial landscapes to such change have been growing high in the last two decades. To achieve a variety of goals including determination of soil carbon stocks and dynamics in the Northern Hemisphere, understanding of soil degradation and optimal ways to protect the fragile ecosystems in the permafrost environment, in-depth studies on cryosol classification are imperative under the situation. In this paper existing Cryosol classifications contained in three representative soil taxonomies are introduced, and problems rising in the practical application of the defining criteria used for category differentiation in these taxonomic systems are discussed. Meanwhile, resumption and reconstruction of Chinese Cryosol classification within a taxonomic frame is proposed. In dealing with Cryosol classification, the advantages that Chinese pedologists have and the challenges that they have to face are analyzed. Finally, several suggestions on in-depth studies of detailed taxonomic frame of the Cryosol classification are put forward.

Key words Cryosols, Permafrost, Soil classification, Taxonomy