

# 热带森林土壤-火关系研究中的土壤火烧严重度指数

## A Soil Burn Severity Index for Understanding Soil-fire Relations in Tropical Forests

Theresa B. Jain, William A. Gould, Russell T. Graham, David S. Pilliod, Leigh B. Lentile, Grizelle González

随着火的频率日益增加、人口及对森林的需求增高,需要有一些方法,来对热带森林中火的影响进行评估。火对土壤的短期和长期影响取决于火前、火中和火后的环境。我们把这些成分放在一个火干扰连续体中,来进行我们的文献分析,并提出了一个综合性的土壤火烧严重度指数。这个土壤火烧严重度指数包含一整套指标,反映了过火之后的存在状态。指数有7个等级,1个未火烧等级和6个描述火后土壤状态的等级。我们认为该指数可用于研究火对森林地表的影响,并且认为随着新信息的获得,该指数可能(像我们预测的那样)会有所修改。

### 引言

热带森林在可燃物积累速度、可燃物的生物量数量、火的频率和强度、及火的影响等方面变化相当大。由于气候(如温度和降雨)、土壤水分蒸发蒸腾速度、自然环境(如地形、地质、海拔)差距很大,这些森林的结构和成分也都发生了很大变化。在干燥热带森林中,生物物理环境的变化及许多地区干湿循环的季节性波动造成了火频率的变化,并产生了火类型的多样性<sup>[1]</sup>。在潮湿和湿润的热带森林中,尽管环境通常很湿,可燃物不足以维持燃烧,但干扰(如火、土地清理)所造成的林冠空地使表层可燃物有可能变得干燥,从而产生了有利于火的条件<sup>[2]</sup>。另外,不论是在干燥热带森林还是在潮湿热带森林中,干扰后的植被通常是由大量的藤本植物、蔓生植物、禾本科植物和非禾本科植物组成,它们补充了可燃物总量,增加了森林发生高强度燃烧的可能性,并且使森林更易受到破坏性火灾的打击<sup>[3, 4]</sup>。如果说火是热带森林的一个组成部分,那么与火有关的森林地表变化及火对土壤有机质的影响就对火后森林群落的组成和结构具有重大影响<sup>[5, 6]</sup>。

火对土壤的影响包括轻微地烧焦有机物,导致总量消耗,也包括使矿物质升温,产生水分排斥性。当温度极高,持续时间过长时,甚至连土壤颗粒都会熔化。曾有一些研究描述过北方温带和温带森林中的这些情形,其结果已被广泛应用于火干扰的研究中<sup>[7, 8]</sup>。在美国落基山脉,火前森林特征和土壤火烧严重度之间关系的研究成果导致了可燃物处理和技术的开发(如计划烧除、采伐方式、活性木质枯落物处置),以图改变火行为和土壤火烧

严重度结果<sup>[9-11]</sup>。

尽管在世界各地已经进行了许多土壤火烧严重度研究,但用于描述火对土壤影响的分类缺乏一致性,难以进行资料综合。为了部分地弥补此项不足, Jain 和 Graham<sup>[12]</sup>在北美西部落基山脉的冷湿和干燥温带森林中使用了一个土壤火烧严重度指数,把获得文献放在 Jain 等人<sup>[13]</sup>提出的一个火干扰连续体背景之中(图1)。Jain 和 Graham<sup>[12]</sup>并不试图重新定义严重度,他们把严重度的现有应用合并为一个综合指数,它适用于各类火和目标,并且可在各种空间和时间尺度上应用。其中包含了丰富的严重度可能结果,从而使使用者可以根据自己的需要或用途来选择、合并或鉴别适

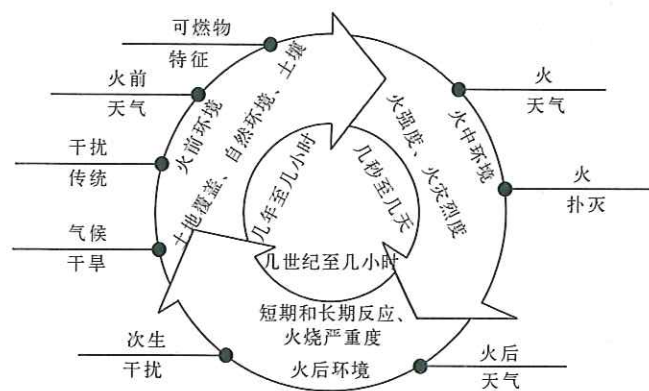


图1 火干扰连续体是一个循环,包括三个组成部分,描述了影响火的不同环境<sup>[13]</sup>。第一个组成部分,火前环境,包括火发生年在火之前的森林植被和环境状态(潮湿水平、生物量数量和物种组成)。但是,像干扰传统和气候这样的因子会影响燃料特性。第二个组成部分,火中环境,包括燃烧期间的特性。这包括天气、火行为和扑灭手段。火强度(用来描述火行为的指标)和火灾烈度(火的直接影响)集中描述了火的过程。第三个组成部分,即火后环境,包括火烧严重度,它描述的是火熄灭后留下来的情形,还有生态、社会和经济反应。这些反应可能在火后立即出现,也可能在几个世纪后才出现。另外,在火后环境中还有其它一些干扰(如,暴风雨或农业开发)在起作用。火后环境特征取决于火前环境和火中环境。就土壤来说,生态反应包括火后土壤的物理、化学和生物特性,是火烧严重度分类的基础

表1 土壤综合火烧严重程度包含7个等级, 包括一个未火烧状态及火后环境的全部情形。指标特征1和2总会出现, 指标特征3有可能出现, 也有可能不出现

指标特征1	指标特征2	指标特征3	土壤火烧严重程度等级
未火烧	没有最近过火迹象	—	0
枯落物层和/或根垫层 > 40%	烧焦的枯落物和未火烧的枯落物都会出现	矿质土壤由未火烧部分和黑色烧焦物组成;	1
枯落物层和/或根垫层 2%~39%	大部分黑色烧焦物影响了矿质土的外貌	火后枯落物减少 木材形成的灰色炭条; 火后枯落物减少	2
枯落物层和/或根垫层 ≤ 1%	大部分灰色和/或白色烧焦物影响了矿质土的外貌	木材下的橙色线条; 火后枯落物减少	3
	大部分黑色烧焦物影响了矿质土的外貌	木材下的灰色烧焦物和橙色土壤;	4
	大部分灰色和/或白色烧焦物影响了矿质土的外貌	火后枯落物减少 木材下出现橙色土壤; 火后枯落物减少	5
	大部分橙色烧焦物影响了矿质土的外貌	土壤表层下 1~2cm 出现黑色灰烬线	6

用的严重程度结果。我们用这种方法, 针对热带森林的火, 开发出了一个土壤火烧严重程度指数的指导性假说, 科学家们可以应用和检验其有效性, 也可以提供改进它的方法。另外, 经营者可以使用指数与危险值之间的确定关系, 来制定干燥和潮湿热带森林的火经营策略。

## 方法

土壤的物理、化学和生物特性受火前、火中和火后环境的影响<sup>[13]</sup>(图1)。火前环境是指能够影响火结果的条件, 如土地覆盖或自然环境。火中环境包括与火有关的火行为特征, 如蔓延速度、火焰长度和所产生的能量(即文献中所说的火强度)<sup>[14, 15]</sup>。火灾烈度, 出现于火事件中, 描述的是火燃烧过程的直接影响<sup>[8]</sup>。土壤火烈度的测量集中于火引起的特殊因子上, 如枯落物消耗或土壤变化。火后环境被形象地描述为燃烧结束后“留下来的东西”或森林地表(土壤)的外貌, 我们称之为土壤火烧严重程度。火烧严重程度特征的背后意图不是测量消耗量, 而是描述在火前和火中环境的背景中火所产生的环境。描述符包括森林地表环境度量, 如新的(火后)和旧的(火前)枯落物的数量、暴露的矿质土壤数量和矿质土壤颜色<sup>[12]</sup>。

我们以火干扰连续体为指导, 综合了描述热带、温带和北方带森林中火影响的有关文献, 修改了为温带森林设计的土壤火烧严重程度指数<sup>[12]</sup>。文献搜索中使用的关键字包括: 1) 热带、火、土壤、火灾烈度、火强度; 2) 有枯落物、无枯落物、消耗量、局部消耗量, 焦炭颜色; 3) 暴露的矿质土壤及其状态或颜色(未火烧、黑、灰、白、橙)。然后, 我们集中了严重度的定义, 重点为热带研究, 确定了描述当前火文献中全部严重度后果特征的最小等级数。我们以这个文献基础和火干扰连续体为框架, 我们确定了适用于热带森林土壤的土壤火烧严重程度等级和等级之间的逻辑突变。我们把土壤火烧严重程度等级指数放入连续体, 来确定这个等级是否能对火前、火中和火后环境的有关特征进行补充。

## 结果

### 土壤火烧严重程度指数

我们确定了7个火烧严重程度等级, 包括1个未火烧等级, 在

火后环境中使用了2个指标变量(枯落物丰富度和矿质土壤颜色)(表1)。由于在几个关于热带森林内未火烧立地的研究中, 普遍使用了未火烧类型, 所以我们增加了没有最近过火迹象的立地指数等级0(表1)。这些立地或者是在火前<sup>[5, 16, 17]</sup>、火区域之外<sup>[6, 18]</sup>, 或者是火区域内的斑块<sup>[19]</sup>。Ellingson等<sup>[20]</sup>在火开始之前曾进行过土壤取样, 也在过火立地附近的参照立地中取过样。我们选择了枯落物(死亡的、部分腐烂的物质, 如草、叶子或针叶)(指标特征1)来描述过火立地的特征, 因为它在所有长有植被的地方都会出现。接下来, 我们把枯落物百分比分为三类。矿质土壤颜色(特征2)可作为土壤物理、生物和化学成分火后状态的指标<sup>[21]</sup>。因此, 我们根据黑色、灰色或橙色烧焦物的丰富度划分了主要的枯落物类型(等级2~6), 产生了6个土壤火烧严重程度等级。我们增加了一个第三类指标特征, 这类指标特征不是总能出现, 因为在热带森林之外, 这些特征是与矿质土壤烧焦物联系在一起的(如不同的矿质土壤炭线)<sup>[22]</sup>。

土壤表层和内部的有机质影响着物理、生物和化学反应, 是土壤火烧严重程度指数内的重要组成部分<sup>[23, 24]</sup>。因为我们在热带研究中没有发现与生态反应相关的枯落物阈值, 所以我们使用了与火后侵蚀潜能有关的非热带文献中所确定的阈值。这些阈值包括30%枯落物层<sup>[25]</sup>、40%枯落物层<sup>[26]</sup>、45%枯落物层<sup>[27]</sup>和50%枯落物层<sup>[28]</sup>。在文献的基础上, 我们选择了40%的枯落物阈值, 以此把等级1和等级2、3区分开。等级1包含40%~100%的枯落物层, 等级2和3的枯落物层为2%~39%。我们用矿质土壤颜色进一步划分了等级2和3, 等级2包含大量黑色烧焦物, 等级3包含大量灰色或白色烧焦物。

在有些热带森林研究中, 还把无枯落物和矿质土壤状态作为严重度的指标。Perez<sup>[19]</sup>在描述火后环境特征时, 把无枯落物、根垫层, 无木质碎片作为严重度的一个指标, Chacón和Dezzeo<sup>[24]</sup>在土壤中和土上有木炭的森林中观察到枯枝落叶袋内的枯落物分解。我们设计了等级4~6, 来反映火后特征(表1)。这些等级要么留有枯落物的残存痕迹(≤1%), 要么没有枯落物残存, 它们是通过矿质土壤的颜色来区分的。等级4矿质土壤中包含大量黑色烧焦物, 等级5则包含大量灰色或白色烧焦物。橙色烧焦物的产生需要一种特别的环境, 如深层腐殖质层或木材的缓慢闷烧。因为这个等级在土地清理活动的迹地清理中很重要, 所以我们在热带森林中增加了等级6(大量橙色土壤)。

## 将土壤火烧严重度指数置于火连续体背景之中

**火前环境。**火前环境的代表因子包括土地覆盖、自然环境和土壤(图1)。它们的特性受到诸如气候和干旱、干扰传统、火前天气、可燃物特性等因素的影响。土地覆盖(植被)反映出可燃物的类型、分布和可燃性<sup>[29, 30]</sup>。例如,热带干燥森林和潮湿森林之间的植被差异会改变火的燃烧方式。通常,干燥森林为混有一些常绿植物的落叶植被,而潮湿森林则主要是常绿植物。与潮湿森林相比,干燥森林的植物生物量较低,生长方式更具变化。干燥森林的空间多样性(草地、森林和农业用地相互混杂)往往高于潮湿森林。由于可燃物的多样性决定着火在整个森林的燃烧方式,决定着火后会留下什么,所以在干燥森林中,土壤火烧严重度等级的种类要比潮湿森林中多,在潮湿森林中,火会更为均匀地掠过景观。干燥森林里还有各种各样的下层植被,它们是表层可燃物,而潮湿森林中复杂的林冠结构抑制了下层植被的发育。所以,在潮湿森林中,取决于枯落物厚度的表层或地表火更容易闷烧<sup>[31]</sup>,土壤火烧严重度往往是等级5和6。

自然环境描述的是景观内的立地位置。它能改变火强度,影响火后反应,如侵蚀和植被再生长,从而影响火烧严重度。景观内火烧地的位置是一个重要的危险值,尤其是与人居、道路和农业实践有关。所以,在土壤火烧严重度等级易为1、2或3的地方,开发应用可燃物处理技术,可能减轻火后影响,如侵蚀可能性,这一点已在热带之外的研究<sup>[25-28]</sup>中提到过。在美国,基于景观位置和暴露的矿质土壤,共同采取了各种火-修复处理和决策,来减轻火后侵蚀<sup>[32]</sup>。

与火烧严重度有关的重要土壤特征包括土壤质地、结构、水分、粘土矿物数量、有机质数量(土壤表层和内部)和可交换离子数。当火发生时,所有这些因素都影响土壤的物理、化学和生物特性<sup>[21]</sup>。例如,在矿质土壤表层,土壤结构受到矿质土壤颗粒与有机质结合的影响。随着深度的增加,粘土矿物在影响土壤结构方面开始起着更为重要的作用,单个矿物微粒的聚合提高了多孔性<sup>[8]</sup>。火能影响粘土矿物和有机成分;所以,火前土壤中这些成分的丰富度会影响火烧严重度结果。在热带以外的地区,这些成分的火成变化可以通过矿质土壤颜色的变化进行典型鉴定,这些变化与生物(如微生物生物量)、化学(如有机质数量和质量)和物理(如水分排斥性和容积密度)条件有关<sup>[8, 21, 33-35]</sup>。把这些火前特征与火烧严重度指数(矿质土壤颜色和有机质丰富度)结合在一起,就可以提高对许多热带研究中常见的火前和火后关系的理解(表2)。

与气候和天气有关的因素,如干旱期,影响着可燃物水分、年生物量和降雨的季节性波动。例如,在热带,火可能在厄尔尼诺-南方震荡出现的某个特殊年份的特殊旱季或湿季出现,或是出现于干扰和未干扰森林的长期干旱之后<sup>[36-38]</sup>。一年中的火烧期引发了预期的可燃物水分,它反过来又影响着火行为和土壤温度,还有火事件的持续时间。在火烧期间,可燃物水分越低,土壤温度就越高。Castaño-Meneses和Palacios-Vargas<sup>[39]</sup>在清理的干燥期(影响水气量)研究了16种蚂蚁的多样性和种群对刀耕火种的反应(表2)。像这样的研究,对比了蚂蚁种群对土壤火烧严重度等级0~3至4~6的反应和活动。在另外一个与可燃物水分有关的研究中,Kauffman等<sup>[40]</sup>用火前干燥期生物量估计了土壤

养分的变化(表2)。这些变化可以用土壤火烧严重度等级0~4进行量化,在等级4,火烧期间养分动态发生的变化最大。年度的火烧期或火烧的特殊年度决定了植被的反应,如Sampaio等<sup>[41]</sup>所述,他用干燥期来解释矮林更新(表2)。土壤火烧严重度指数内各等级的范围会根据火烧年度的气候和天气而发生变化。

干扰传统(如最后一次干扰的类型和时程)是影响火前环境的一个因素,在刀耕火种农业盛行的地区,如新热带区,尤为重要。火前干扰(或缺乏干扰)会决定热带森林中表层可燃物的构造、数量和含水量。干扰所造成的林冠空地会使这些可燃物变干<sup>[2]</sup>,还会从次生森林植被的生长中产生更多可燃物。干扰传统包括过去的火频率或其它干扰<sup>[2]</sup>,如刀耕<sup>[39]</sup>或滑坡<sup>[5]</sup>。有一些研究在研究火对热带森林的作用时,把干扰传统看作是一个变异源<sup>[24, 42-45]</sup>(表2)。

上述所有因素之间的相互作用影响了可燃物特性。文献中描述的许多火影响都与火前可燃物载量和可燃物水分有关<sup>[40, 41]</sup>(表2)。可燃物由活的和死的有机质组成,它们的密度和含水量随时间和空间的不同而发生变化。可燃物的垂直分布和水平分布也是很重要的。例如,与土壤表层接触或离土壤表层极近的粗木质碎片(直径>8cm)燃烧,会长时间地把大量热能传入矿质土壤,从而改变土壤的物理、化学和生物特性<sup>[46-48]</sup>。在与土地清理活动普遍有关的迹地清理中,橙色土壤的出现(土壤火烧严重度等级为6)表明曾经存在过木质碎片,使火的持续时间长,土壤温度高。

**火和火后环境。**火的严重度集中于土壤升温,它包括温度和持续时间,还有热量穿透的深度和火消耗掉的物质数量<sup>[7, 49]</sup>。火强度和火严重度之间的关系不是一对一的。闷烧的火(低强度)会使土壤高度升温。相反,一场快速移动的高强度火会使土壤升温较低<sup>[8]</sup>。当然,可燃物的载量和类型,还有先前提到的其它因素,都极大地影响着土壤内的热能脉冲和温度产物。在一场火中,生成的温度有着相当典型的变化,不论是在水平方向上还是垂直方向上。但是,土壤温度和升温持续时间的范围造成了特定的火烧严重度结果。对温度和升温持续时间作用的研究,与火烧严重度指数结合在一起,形成了预测火烧的物理、化学和生物影响的方法。在那些消耗量(火严重度的一个量度)引起人们兴趣的案例中,倘若提到过枯落物层的火前特征和土壤颜色,那么可反转使用指数。

Certini在一个关于火对森林土壤特性的影响的文献综述中<sup>[21]</sup>曾提出,与火有关的土壤物理特征包括水分排斥性、结构稳定性、容积密度、颗粒大小分布、矿物学聚集和颜色。DeBano<sup>[50]</sup>发现,当土壤温度在200~260℃的时间超过15分钟,水分排斥性就加强了。土壤火烧严重度等级3和4(尤其是等级4)往往象征着加强水分排斥性的环境。如果现存的枯落物不多(≤1%),并有大量灰色或橙色土壤,那么说明温度曾经超过290℃,水分排斥性被破坏<sup>[8]</sup>(等级5和6)。但是,要估计侵蚀的可能性,还必须满足土壤类型、它们的自然环境和其它土壤侵蚀指标<sup>[51]</sup>。如前所述,我们根据火后侵蚀的可能性,选择了40%枯落物层作为土壤火烧严重度等级1和2之间的阈值。另外,Lewis等<sup>[25]</sup>发现,与小于30%枯落物一起出现的矿质土壤上灰色烧焦物是潜在的水分排斥性的指示物。Certini<sup>[21]</sup>指出,火会引发矿物学变化,但只有温度超过500℃时才可以。Ketterings等<sup>[47]</sup>证实了此点,他们

表2 研究者确定或讨论过火后生态结果(火后反应)的热带森林研究。许多研究都研究了火前条件,并以此来显示它与火后反应的关系。测量时间下的“×”表示研究者是否获得了火前和火后的测量数据。火后土壤特征一栏表示描述常常具有火烧严重度的特征。有一些研究者在研究中没有使用火后特征

火前研究或变异源	火后反应	测量时间		火后土壤特征	文献来源
		火前	火后		
可燃物水分	养分	×	×	无	6
可燃物水分	蚂蚁	×	×	无	39
可燃物水分	矮林更新	×	×	无	41
可燃物水分	生物量&养分	×	×	无	10
可燃物载量	更新	×	×	无	56
可燃物载量&水分	养分	×	×	生物量消耗	20
可燃物载量&水分	养分	×	×	无	17
可燃物载量&水分	养分	×	×	无	16
干扰传统	植被	×	×	无	2
无	植物死亡率	×	×	森林地被	19
干扰传统	植被	-	×	更新策略	43
可燃物载量	植被	-	×	无	48
可燃物载量	植物死亡率	-	×	土壤颜色	47
可燃物载量	磷	×	×	土壤颜色	46
火前&火后	矿物学	×	×	无	5
可燃物载量	土壤肥力	×	×	无	34
干扰传统	养分	-	×	可燃物生物量	42
干扰传统	养分	-	×	生物量	44
干扰传统	植被	-	×	生物量分布	45
干扰传统	枯落物分解	-	×	森林地被	24
农业用地	土壤化学	-	×	残留枯落物	23
农业用地	土壤化学	-	×	枯落物&土壤烧焦物	35

发现在迹地清理中,剧烈的燃烧(>500℃)改变了土壤矿物学,橙色土壤出现(等级6)。虽然矿物学变化只在高温条件下出现,但在类似的研究中也应用了土壤火烧严重度指数,来更好地研究土壤外貌及其与土壤物理特性的关系。

土壤火烧严重度指数的目的是确定火导致的养分火后状态的相关指标。在大约175℃时,枯落物开始烧焦,但并没有被彻底毁灭(等级1)<sup>[52]</sup>。因此,尽管被烧焦了,仍然有枯落物存在,表明在氮方面有少许变化。黑色烧焦物(燃烧后残存的枯落物)往往出现在约175~300℃(等级2)<sup>[52]</sup>。在约300~500℃,开始出现灰色烧焦物(等级3和5),导致氮挥发和矿化<sup>[53, 54]</sup>。约400~>500℃时,橙色土壤(等级6)随处可见,表明氮的巨大损失<sup>[46]</sup>。另外,这些化学变化分别在温度相对较低的条件下(约175~400℃)(等级1~4)快速发生。相反,当有机体挥发时,其它养分,如硫、钠、钾、镁和磷的浓度随着温度的升高而增加<sup>[47, 55]</sup>(等级5和6)。枯落物较多(等级1)及黑色烧焦物(等级2和4)、灰色烧焦物(等级3和5)和橙色烧焦物(等级6)的出现就是火后养分丰富度的指示物。

植被反应主要取决于火后植物成分是否依然活着或有生存能力<sup>[41, 56]</sup>。树木是火后被研究最多的植被。但下层植被,如多年生非禾本草植物、禾本科植物和灌木,会影响火后环境。种子的萌发取决于是否有种子。种子常常出现在有机体表层中或矿质土壤表层<sup>[56]</sup>。土壤火烧严重度等级0或1表示有种子存在。大多数种子能经受住约70~140℃的温度,持续时间为0.5~1.5小时,具体情形取决于种子大小<sup>[49]</sup>。由于枯落物烧焦往往始于约175℃,所以任何没被烧焦的物质中都表示其中的一些种子极有可能生存下来。多年生非禾本草植物的存活主要取决于繁殖方式和匍匐枝、主轴、根状茎和/或鳞茎的土壤深度。所以,像暴露矿质土

壤(等级3~6)、烧焦物颜色(等级2~6)和烧焦物深度这些与芽的位置有关的因子都是火后植被反应的火烧严重度的有用指示物(表1)。

节肢动物、软体动物、蚯蚓、真菌、细菌和其它生活在表层和矿质土壤层内的有机体起着重要的生态作用,从土壤生成到养分循环。土壤有机体对土壤结构和过程的影响在很大程度上是源于土壤微生物和动物的高度多样性和丰富度<sup>[57]</sup>。例如,土壤微节肢动物的密度能达到每平方米上千至上百万个个体,甚至在低有机质的干燥土壤中(如海岸沙丘)亦是如此<sup>[58]</sup>。在温度约60~100℃时,火开始影响土壤有机体<sup>[49]</sup>(等级1)。Guerrero等<sup>[55]</sup>在一个实验室试验中发现,当土壤温度达到300℃(等级2~4)时,微生物碳有91%的损失。所以,相对低的火烧严重度就能影响微生物群落<sup>[59]</sup>。

## 讨论

我们的目标是通过合并和综合各地土壤火烧严重度的相关资料,建立一个可应用于热带系统并有助于评估火影响的简单土壤火烧严重度指数。土壤火烧严重度等级描述了一个包括全部火结果的连续体,火结果是否有害取决于用途和经营目标。例如,有些人认为剧烈的火(等级6)是有益的,因为火后出现的物种对疾病和其它干扰的恢复力更好<sup>[60]</sup>。因此,我们没有给我们的土壤火烧严重度指数等级安上一个绝对数值(如低、中、高),而是根据目的,从科学研究和经营问题中得出结果,给出了特殊值。

土壤火烧严重指数的适用性取决于人们将它作为一个可被检验和评估的假设的接受程度。当研究者增加热带系统中火的资料时,该指数发生变化,来反映新资料中的内容。我们设计该指数

的目的是建立一个标准化指数,来进行等级评估。科学家们可以不使用全部的7个等级。当然,我们相信,通过我们的文献综合,研究者们将分类、选择或在某些情况下把等级分得更细致。例如,一个对土壤动物感兴趣的土壤科学家,会集中研究对比等级0至等级1,然后把等级1分成亚等级,来验证枯落物层40%的阈值。不管怎样,使用该指数来说明研究集中于土壤火烧严重程度等级1,可以使科学家们可以轻松地不同论坛上交流信息、提供背景资料,共同对话,并且会拓宽研究结果的应用范围。这样,对热带森林中火的相关知识的研究将会被整合,并应用于各种用途。

在建立土壤火烧严重程度指数时,产生了一些有关其适用性的问题。例如,假设可燃物处理的目的是为了抑制火,那么它有没有可能影响火烧严重程度结果?目前有许多人正在研究火前环境(可燃物)的作用及其对土壤火烧严重程度的影响<sup>[11]</sup>,这些在可燃物处理技术的开发及应用中具有特殊用途。当科学资料与土壤火烧严重程度指数联系起来,如我们介绍的,其结果就可用来指导经营活动。

另一个与指标特性有关的问题是土壤火烧严重程度等级(表1)。如果这些特征在不只一个土壤火烧严重程度等级上出现怎么办?尽管这种情况会经常发生,但我们的目的是量化最明显的特征。所以,我们选择了相对较多的烧焦物分类,而没有选择最多的或是大多的。而且,枯落物层是明显和首要的指示物,可以清楚地区分各等级。另一个应用是详细量化实际枯落物层和不同烧焦物类型,然后将数据后分类为土壤火烧严重程度指数。该方法非常适用于指数有效性检验,适用于土壤结果的量化和交流。

其它问题是关于空间和时间方面的。例如,对侵蚀或无脊椎动物群落内变化具有正或负影响的最小空间范围是多大?再如,作为土壤火烧严重程度的一个功能,火后微生物恢复所需的时间框架是多少?这些问题并没有明确答案,在文献中也罕有回答。我们希望通过检验和使用土壤火烧严重程度指数,可以把各种研究综合起来,开始解答这些问题。还有一个问题是关于量化土壤火烧严重度的样地合适大小。文献中使用过各种取样过程,样地大小依科学目的或经营目标而发生改变。土壤火烧严重程度指数的目的是量化火后特征,不论样地大小或研究目的怎样。

## 结论

在自然资源经营中,需要对火影响进行评估的方法和对生态系统对野火的反应进行预测的方法。随着农业、人居、商业和休闲给土地带来的人为压力增加,还有对与空气、水和生物多样性保护有关的生态系统服务功能的压力增加,这些需求也将增加。在热带,尤其是在人口压力大的地区,这些需求正在增加。发展中所取得的经验教训和采用一致的评估方法都有助于预测生态系统对不同火类型的反应,从而加深了我们对跨区域和跨学科的土壤-火关系的理解。土壤火烧严重度的这些应用资料会产生一致的火计划,调整火前条件,以获得预期结果和反应。土壤火烧严重程度指数是一种方法,能增加我们对火在热带森林中的作用的生态理解。Cochrane和Schulze<sup>[2]</sup>说:“要建立区域火动态模型或估计火对森林健康产生的后果,就必须不遗余力地清楚表述过火森林内部的极端异质性。”我们相信,土壤火烧严重程度指数就是

朝此方向迈进的一步。

## 参考文献与注释

1. Pyne, S.J., Andrews, P.L. and Laven, R.D. 1996. *Introduction to Wildland Fire*. John Wiley & Sons, New York, 769 pp.
2. Cochrane, M.A. and Schulze, M.D. 1999. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: effects on forest structure, biomass, and species composition. *Biotropica* 31, 2-16.
3. Uhl, C. and Kauffman, J.B. 1990. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology* 71, 437-449.
4. Pinard, M.A., Putz, F.E. and Licona, J.C. 1999. Tree mortality and vine proliferation following a wildfire in a subhumid tropical forest in eastern Bolivia. *Forest Ecol. Manag.* 116, 247-252.
5. Walker, L.R. and Boneta, W. 1995. Plant and soil responses to fire on a fern-covered landslide in Puerto Rico. *J. Trop. Ecol.* 11, 473-479.
6. Kennard, D.K. and Gholz, H.L. 2001. Effects of high- and low-intensity fires on soil properties and plant growth in a Bolivian dry forest. *Plant Soil* 234, 119-129.
7. Wells, C.G., Campbell, R.E., DeBano, L.F., Lewis, C.E., Fredriksen, R.L., Franklin, E. C., Froelich, R.C., et al. 1979. *Effects of Fire on Soil: A State of Knowledge Review*. Forest Service National Fire Effects Workshop, 10-14 April 1978. US Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC, 34 pp.
8. DeBano, L.F., Neary, D.G. and Ffolliott, P.F. 1998. *Fire's Effects on Ecosystems*. John Wiley & Sons, New York, 333 pp.
9. Graham, R.T., Harvey, A.E., Jain, T.B. and Tonn, J.R. 1999. *The Effects of Thinning and Similar Stand Treatments on Fire Behavior in Western Forests*. General Technical Report PNW-GTR-463. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, 27 pp.
10. Peterson, D.L., Johnson, M.C., Agee, J.K., Jain, T.B., McKenzie, D. and Reinhardt, E. D. 2005. *Forest Structure and Fire Hazard in Dry Forests of the Western United States*. General Technical Report PNW-GTR-628. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, 30 pp.
11. Jain, T.B., Graham, R.T., Sandquist, J., Butler, M., Brockus, K., Frigard, D., Cobb, D., Sup-Han, H., et al. 2008. Restoration of northern Rocky Mountain moist forests: integrating fuel treatments from the site to the landscape. In: *Integrated Restoration of Forested Ecosystems to Achieve Multi-Resource Benefits: Proceedings of the 2007 National Silviculture Workshop, 7-11 May 2007*. Deal, R.L. (ed). US Department of Agriculture, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, pp. 1-26.
12. Jain, T.B. and Graham, R.T. 2007. The relation between tree burn severity and forest structure in the Rocky Mountains. In: *Restoring Fire-Adapted Forested Ecosystems: Proceedings of the 2005 National Silviculture Workshop, 6-10 June 2005*. Powers, R. (ed). General Technical Report PSW-GTR-203. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, California, pp. 213-250.
13. Jain, T.B., Graham, R.T. and Pilliod, D.S. 2004. *Tongue-tied. Wildfire July/August*, 22-26.
14. Davis, K.P. 1959. *Forest Fire: Control and Use*. McGraw-Hill, New York, 584 pp.
15. Roehmel, R.C. 1972. *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Research Paper INT-115. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 40 pp.
16. Döckersmith, I.C., Giardina, C.P. and Sanford, R.L. Jr. 1999. Persistence of tree related patterns in soil nutrients following slash-and-burn disturbance in the tropics. *Plant Soil* 209, 137-156.
17. Giardina, C.P., Sanford, R.L. Jr., Döckersmith, I.C. and Jaramillo, V.J. 2000. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. *Plant Soil* 220, 247-260.
18. García-Oliva, F., Sanford, R.L. Jr. and Kelly, E. 1999. Effect of burning of tropical deciduous forest soil in Mexico on the microbial degradation of organic matter. *Plant Soil* 206, 29-36.
19. Peres, C.A. 1999. Ground fires as agents of mortality in a central Amazonian forest. *J. Trop. Ecol.* 15, 535-541.
20. Ellingson, L.J., Kauffman, J.B., Cummings, D.L., Sanford, R.L. Jr. and Jaramillo, V.J. 2000. Soil N dynamics associated with deforestation, biomass burning, and pasture conversion in a Mexican tropical dry forest. *Forest Ecol. Manag.* 137, 41-51.
21. Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1-10.
22. Ryan, K.C. and Noste, N.V. 1985. Evaluating prescribed fires. In: *Proceedings of the Symposium and Workshop on Wilderness Fire, 15-18 November 1983*. Lotan, J.E., Kilgore, B.M., Fischer, W.C. and Mutch, R.W. (tech. coords.). General Technical Report INT-182. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, pp. 230-238.
23. Cern, C.C., Volkoff, B. and Andreux, F. 1991. Nature and behaviour of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning, and cultivation, near Manaus. *Forest Ecol. Manag.* 38, 247-257.
24. Chacón, N. and Dezeo, N. 2007. Litter decomposition in primary forest and adjacent fire-disturbed forests in the Gran Sabana, southern Venezuela. *Biol. Fert. Soils* 43, 815-821.
25. Lewis, S.A., Wu, J.Q. and Robichaud, P.R. 2006. Assessing burn severity and comparing soil water repellency, Hayman Fire, Colorado. *Hydro. Process.* 20, 1-16.
26. Johansen, M.P., Hakonson, T.E. and Breshers, D.D. 2001. Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands. *Hydro. Process.* 15, 2953-2965.
27. Benavides-Solano, J. and MacDonald, L.H. 2001. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range. *Hydro. Process.* 15, 2931-2952.
28. Pannkuk, C.D. and Robichaud, P.R. 2003. Effectiveness of needle cast at reducing erosion after forest fires. *Water Resour. Res.* 39, 1333-1344.
29. Ewel, J.J. 1977. Differences between wet and dry successional tropical ecosystems. *Geo. Eco. Trop.* 1, 103-117.
30. Murphy, P.G. and Lugo, A.E. 1986. Ecology of tropical dry forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17, 67-88.
31. Cochrane, M.A. and Schulze, M.D. 1998. Forest fires in the Brazilian Amazon. *Conserv. Biol.* 12, 948-950.
32. Robichaud, P.R., Beyers, J.L. and Neary, D.G. 2000. *Evaluating the Effectiveness of Postfire Rehabilitation Treatments*. General Technical Report RMRS-GTR-63. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, 85 pp.
33. Ulery, A.L. and Graham, R.C. 1993. Forest fire effects on soil color and texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 135-140.
34. Jensen, M., Michelsen, A. and Gashaw, M. 2001. Responses in plant, soil inorganic and microbial nutrient pools to experimental fire, ash and biomass addition in a woodland savanna. *Oecologia* 128, 85-93.
35. Rumpel, C., González-Pérez, J.A., Bardoux, G., Largeau, C., González-Vila, F.J. and Valentin, C. 2007. Composition and reactivity of morphologically distinct charred

- materials left after slash-and-burn practices in agricultural tropical soils. *Org. Geochem.* 38, 911-920.
36. Sanford, R.L. Jr., Saldarriaga, J., Clark, K.E., Uhl, C. and Herrera, R. 1985. Amazon rain-forest fires. *Science* 227, 53-55.
  37. Hammond, D.S. and ter Steege, H. 1998. Propensity for fire in Guianan rainforests. *Conserv. Biol.* 12, 944-947.
  38. Siebert, F., Ruecker, G., Hinrichs, A. and Hoffmann, A.A. 2001. Increased damage from fires in logged forests during droughts caused by El Niño. *Nature* 414, 437-440.
  39. Castaño-Meneses, G. and Palacios-Vargas, J.G. 2003. Effects of fire and agricultural practices on neotropical ant communities. *Biodivers. Conserv.* 12, 1913-1919.
  40. Kauffman, J.B., Sanford, R.L. Jr., Cummings, D.L., Salcedo, I.H. and Sampaio, E.V.S.B. 1993. Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. *Ecology* 74, 140-151.
  41. Sampaio, E.V.S.B., Salcedo, I.H. and Kauffman, J.B. 1993. Effect of different fire severities on coppicing of Caatinga vegetation in Serra Talhada, PE, Brazil. *Biotropica* 25, 452-460.
  42. Kauffman, J.B., Uhl, C. and Cummings, D.L. 1988. Fire in the Venezuelan Amazon 1: fuel biomass and fire chemistry in the evergreen rainforest of Venezuela. *Oikos* 53, 167-175.
  43. Kauffman, J.B. 1991. Survival by sprouting following fire in tropical forests of the eastern Amazon. *Biotropica* 23, 219-224.
  44. Kauffman, J.B., Cummings, D.L., Ward, D.E. and Babbitt, R. 1995. Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. *Oecologia* 104, 397-408.
  45. Gehring, C., Denich, M. and Vlek, P.L.G. 2005. Resilience of secondary forest regrowth after slash-and-burn agriculture in central Amazonia. *J. Trop. Ecol.* 21, 519-527.
  46. Ketterings, Q.M. and Bigham, J.M. 2000. Soil color as an indicator of slash-and-burn fire severity and soil fertility in Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1826-1833.
  47. Ketterings, Q.M., Bigham, J.M. and Laperche, V. 2000. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1108-1117.
  48. Ketterings, Q.M., van Noordwijk, M. and Bigham, J.M. 2002. Soil phosphorus availability after slash-and-burn fires of different intensities in rubber agroforests in Sumatra, Indonesia. *Agr. Ecosyst. Environ.* 92, 37-48.
  49. Levitt, J. 1980. *Responses of Plants to Environmental Stress*. Volume 1: Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses. Academic Press, New York, 497 pp.
  50. DeBano, L.F. 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *J. Hydrol.* 231-232, 195-206.
  51. Pejón, O.J. and Lyrio da Silveira, L.L. 2007. Index properties to predict erodibility of tropical soil. *B. Eng. Geol. Environ.* 66, 225-236.
  52. Bentley, J.R. and Fenner, R.L. 1958. Soil temperatures during burning related to postfire seedbeds on woodland range. *J. Forest* 56, 737-740.
  53. White, E.M., Thompson, W.W. and Gartner, F.R. 1973. Heat effects on nutrient release from soils under ponderosa pine. *J. Range Manage.* 26, 22-24.
  54. Hungerford, R.D., Harrington, M.G., Frandsen, W.H., Ryan, K.C. and Niehoff, G.J. 1991. Influence of fire on factors that affect site productivity. In: *Management and Productivity of Western-Montane Forest Soils Proceedings*. General Technical Report INT-280. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, Utah, pp. 32-49.
  55. Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Gómez, I., García-Orenes, F. and Jordán, M.M. 2005. Microbial recolonization and chemical changes in a soil heated at different temperatures. *Int. J. Wildland Fire* 14, 385-400.
  56. Kennard, D.K., Gould, K., Putz, F.E., Fredericksen, T.S. and Morales, F. 2002. Effect of disturbance intensity on regeneration mechanisms in a tropical dry forest. *Forest Ecol. Manag.* 162, 197-208.
  57. Bardgett, R.D. 2002. Causes and consequences of biological diversity in soil. *Zoology* 105, 367-374.
  58. Andre, H.M., Noti, M.I. and Lebrun, P. 1994. The soil fauna: the other last biotic frontier. *Biodivers. Conserv.* 3, 45-56.
  59. Palm, C.A., Swift, M.J. and Wooster, P.L. 1996. Soil biological dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agr. Ecosyst. Environ.* 58, 61-74.
  60. Simard, A.J. 1991. Fire severity, changing scales, and how things hang together. *Int. J. Wildland Fire* 1, 23-34.

Theresa B. Jain, 美国农业部 (USDA) 林业局研究林务官。她的地址: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1221 S. Main, Moscow, ID 83843, USA.

tjain@fs.fed.us

William Gould, USDA 林业局研究生态学家。他的地址: USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry, Río Piedras, 00926-1115, Puerto Rico.

wgould@fs.fed.us

Russell T. Graham, USDA 林业局研究林务官。他的地址: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1221 S. Main, Moscow, ID 83843, USA.

rtgraham@fs.fed.us

David S. Pilliod, 美国地质调查局研究生态学家。他的地址: US Geological Survey, Forest and Rangeland Ecosystem Science Center, Snake River Field Station, 970 Lusk St., Boise, ID 83706, USA.

dpilliod@usgs.gov

Leigh B. Lentile, 南部大学助理教授。她的地址: The University of the South, 735 University Avenue, Sewanee, TN 37375, USA.

lbelentil@sewanee.edu

Grizelle González, USDA 林业局研究生态学家。她的地址: USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry, Río Piedras, 00926-1115, Puerto Rico.

ggonzalez@fs.fed.us

[王 胜译]